KRAUTOV STROJARSKI PRIRUČNIK

AXIOM

Odgovorni stručni urednik:
Kuzman Ražnjević, dipl. ing.

Nakladnik:
»Axiom«, d.o.o., Zagreb

Jezicni savjetnik:
Josip Živković

Tehnički urednik:
Slavko Vlahov

Kompjutorski slog:
»Denona«, d.o.o., Zagreb

CIP - Katalogizacija u publikaciji
Nacionalna i sveučilišna knjižnica, Zagreb

UDK62K035)

KRAUT, Bojan
Krautov strojarski priručnik / [odgovorni urednik: Kuzman Ražnjević; suradnici Ivo Alfirević ... et al.L - 10. hrvatsko izd. - Zagreb: Axiom, 1997. - XVI, 768 str. : graf. prikazi; 15 cm

Izv. stv. nasl.: Krautov strojniški priročnik. - Bibliografija: str. 740. - Kazalo.

ISBN 953-97119-1-6

971121031

Tisak: »Kratis«, Zagreb

Tisak dovršen: u studenom 1997.

ISBN 953-97119-1-6

Objavljivanje ovog djela novčano je potpomoglo Ministarstvo znanosti i tehnologije Republike Hrvatske.

Popis suradnika u prijevodu i preradbi ovog 10. hrvatskog izdanja:

Prof. dr. sc. Ivo Alfirević Mr. sc. Šimun Andrić Prof. dr. sc. Zdravko Doliner Prof. dr. sc. Mladen Franz Prof. dr. sc. Antun Galović Prof. dr. sc. Janez Indof Prof. dr. sc. Vinko Ivušić Prof. dr. sc. Franjo Kovačiček Mr. sc. Damir Markučič Prof. dr. sc. Milan Opalić Prof. dr. sc. Boris Pavković Prof. dr. sc. Miroslav Pečornik Dipl. ing. Kuzman Ražnjević Prof. dr. sc. Branko Somek Prof. dr. sc. Mladen Stupnišek

PREDGOVOR

Ovo deseto hrvatsko izdanje *Krautova strojarskogpriručnika* doživjelo je najveće promjene i preradbu u odnosu na sva prethodna hrvatska i slovenska izdanja. Budući da je ova knjiga s mnoštvom brojčanih i tabličnih podataka, naročita pozornost posvećena je glavama tablica kako bi se otklonila dvojba pri očitavanju određenih brojčanih podataka.

Osim toga, u ovom izdanju uvedene su hrvatske norme i njihove oznake (HRN), što će povećati i proširiti interes za ovim dobrim i nadasve korisnim djelom, tim više što je ovo prva i, za sada, jedina knjiga iz ovog područja znanosti, u kojoj su svi tablični brojčani i ostali relevantni podatci iskazani hrvatskim normama i njihovim oznakama (HRN).

Nazivi i znakovi fizikalnih veličina i mjernih jedinica usklađeni su s najnovijim nazivima i znakovima svjetskih normi i hrvatskim nazivljem.

Ova knjiga pokriva područje strojarstva u potpunosti. Namijenjena je profesorima, strojarskim inžinjerima, studentima, tehničarima, đacima tehničkih škola i strojarskim steručnjacima u praksi. Rabe je i električari, kemičari, građevinari i arhitekti. Sadržaj gradiva za tako različite stupnjeve znanja i školovanja velika je prednost i rijetkost ovog djela.

Cinjenica da je ovo djelo, do sada 12 slovenskih i 9 hrvatskih izdanja i 4 reprintna izdanja, ukupno 25 izdanja, tiskano u nakladi preko 300 000 primjeraka, dovoljno govori o njegovoj vrijednosti.

Toplo se zahvaljujem svima onima koji su neposredno ili posredno sudjelovali na pripremi i izdavanju ovog djela.

Zahvaljujem Ministarstvu znanosti i tehnologije Republike Hrvatske koje je novčano potpomoglo ovo izdanje.

U nadi da će i ovo novo izdanje biti dobro primljeno, unaprijed zahvaljujem čitateljima na korisnim napomenama i upozorenjima na možebitne pogrješke.

Odgovorni i stručni urednik

Kuzman Ražnjević

SADRZAJ

PRVI DIO

DRUGIDIO

UPUTA ZA UPORABU TABLICA

Svaka se veličina može iskazati umnoškom brojčane vrijednosti i mjerne jedinice. Neodređena veličina X može se pisati:

$$X = \{X\} \, [X], \qquad (1)$$

gdje je $\{X\}$ brojčana vrijednost, a $[X]$ pripadna mjerna jedinica. Jednadžba (1) može se pisati i u obliku razlomka:

$$\{X\} = \frac{X}{[X]}, \qquad (2)$$

slijedi da je brojčana vrijednost $\{X\}$ jednaka kvocijentu fizikalne veličine X i mjerne jedinice $[X]$.

To vrijedi za bilo koju fizikalnu veličinu. Na primjer, neodređena veličina duljina l može se pisati:

$$l = \{l\} \, [l], \qquad (3)$$

odnosno brojčana vrijednost $\{l\}$ jednaka je:

$$\{l\} = \frac{l}{[l]}. \qquad (4)$$

Kad je neka veličina određena, odnosno poznata, npr. udaljenost između dva grada iznosi 180 km, prema izrazu (3) to se piše:

$$l = 180 \text{ km},$$

gdje je $180 = \{l\}$ brojčana vrijednost, a km $= [l]$ pripada mjerna jedinica duljine.

Prema jednadžbi (2) i (4) brojčana vrijednost 180 je kvocijent veličine duljine l i pripadne mjerne jedinice km, tj.

$$180 = \frac{l}{\text{km}}.$$

Brojčana vrijednost u tablici je kvocijent one fizikalne veličine i mjerne jedinice koja se nalazi u istom stupcu u glavi tablice. U ovoj knjizi u glavama tablica nalazi se naziv veličine, kvocijent te veličine i odgovarajuće mjerne jedinice, gdjegod je to prostorno moguće. Na primjer, treba odrediti specifični toplinski kapacitet c za aluminij. Na stranici 248 kvocijent veličine c i jedinice kJ/(kg K) koji je u glavi tablice u stupcu za specifični toplinski kapacitet, treba izjednačiti sa brojčanom vrijednosti 0,896 koja se nalazi u istom stupcu i retku za aluminij:

$$\frac{c}{\text{kJ/(kg K)}} = 0{,}896$$

slijedi da je vrijednost veličine specifični toplinski kapacitet za aluminij:

$$c = 0{,}896 \text{ kJ/(kg K)}.$$

Ako se brojčane vrijednosti nalaze u retku vodoravno kao što je tablica kinematičke viskoznosti na koncu stranice 164, onda se kvocijent veličine i jedinice piše s lijeve strane na početku retka.

Na primjer, treba odrediti kinematičku viskoznost ν pri nadmorskoj visini h = 20 km (tablica na stranici 164, zadnji redak):

$$\nu/(\text{mm}^2/\text{s}) = 160{,}0$$

slijedi da je vrijednost veličine kinematičke viskoznosti:

$$\nu = 160{,}0 \text{ mm}^2/\text{s}.$$

Ovakav način prikazivanja fizikalnih veličina je korektan i jednoznačan, i nije potrebno posebno navoditi na koje se jedinice odnose brojčane vrijednosti u tablicama (kao što je ona »u« koji se često rabi.

UPUTE ZA UPORABU PRIRUČNIKA

1. Pisanje razlomaka s kosom razlomačkom crtom

Zbog skučenog prostora i radi pojednostavnjenja tiskarskog sloga, razlomci su pisani kosom razlomačkom crtom. Pri tome se smatra da se značenje razlomačke crte proteže do prvog znaka plus, minus ili puta:

$$ab/cd = ab/(cd) = (ab)/(cd) = \frac{ab}{cd} \qquad ab/c \cdot d = (ab/c) \cdot d = \frac{ab}{c}\,d$$

$$(a+b)/(c+d) = \frac{a+b}{c+d} \qquad a + b/c + d = a + \frac{b}{c} + d.$$

2. Označavanje vektora

Vektori su u ovom priručniku označeni u tekstu i slikama debljim tiskom simbola ($\boldsymbol{a}$).

3. Označavanje lučne mjere

Da pri uporabi formula ne bi došlo do zamjene između mjere za kut (°) i lučne mjere (rad), simboli su označeni za:

kut (u stupnjevima) α

kut u lučnoj mjeri (analitički kut) $\hat{\alpha}$.

Osim toga je u svim jednadžbama, gdje se pojavljuje lučna mjera, dodano još upozorenje: â (rad).

4. Uporaba formula u tehnici i fizici

Pri uporabi takvih formula sve veličine moraju biti izražene u koherentnim jedinicama, tj. u istom sustavu jedinica.

Sve SI jedinice su međusobno koherentne. Stoga je pri uporabi tih formula osobito preporučljivo rabiti te jedinice i dobit će se pravilni rezultati.

Ako se radi o jednostavnijim formulama onda se mogu uporabiti i drugi prikladniji sustavi jedinica.

Kod složenijih formula moguće je pogrješke izbjeći isključivo uporabom SI jedinica. Ako su neke veličine zadane u drugim jedinicama valja ih najprije pretvoriti u SI jedinice.

Predmetni primjeri navedeni su na str. XVI.

Primjeri [1)]

a) brzina $v = s/t$

Za:	$s = 24$ km	$= 24\,000$ m
	$t = 20$ min $= 0{,}333$ h	$= 1\,200$ s
je:	$v = \dfrac{24\,000}{1\,200} = 20$ m/s	
ili	$v = \dfrac{24 \text{ km}}{0{,}333 \text{ h}} = 72$ km/h	(= 20 m/s).

b) Čvrstoća $R_m = F_m / S_0$

Za:	$F_m = 7{,}5$ kN	$= 7\,500$ N
	$S_0 = 20$ mm^2	$= 20 \cdot 10^{-6}$ m^2
je:	$R_m = \dfrac{7\,500}{20 \cdot 10^{-6}} = 375 \cdot 10^6$ N/m^2	(= 375 MPa).
ili	$R_m = \dfrac{7\,500 \text{ N}}{20 \text{ mm}^2} = 375$ N/mm^2	(= 375 MPa)

c) Brzina istjecanja $v_0 = \sqrt{2\,(g\,h + \Delta\,p/\varrho)}$

Za:	$g = 9{,}81$ m/s^2	$= 9{,}81$ m/s^2
	$h = 510$ cm	$= 5{,}1$ m
	$\Delta p = 2{,}5$ bar	$= 2{,}5\ 10^5$ Pa
	$\varrho = 1$ kg/dm^3	$= 1\,000$ kg/m^3
je:	$v_0 = \sqrt{2(9{,}81 \cdot 5{,}1 + 2{,}5 \cdot 10^5/10^3)}$	$= 24{,}5$ m/s.

d) Toplinski tok $\Phi = k(T_1 - T_2)\,A$

Za:	$k = 100$ W/(m^2 K)	$= 100$ W/(m^2 K)
	$t_1 = 70$ °C	$T_1 - T_2 = 50$ K
	$t_2 = 20$ °C	
	$A = 200$ dm^2	$= 2$ m^2
je:	$\Phi = 100 \cdot 50 \cdot 2 = 10\,000$ W	(= 10 kW).

e) Prandtlov broj $Pr = \varrho\, c\, \nu/\lambda$

Za:	$\varrho = 0{,}871$ kg/dm^3	$= 871$ kg/m^3
	$c = 1{,}850$ kJ/(kg K)	$= 1\,850$ J/(kg K)
	$\nu = 15{,}0$ mm^2/s	$= 15{,}0 \cdot 10^{-6}$ m^2/s
	$\lambda = 0{,}144$ W/(m K)	$= 0{,}144$ W/(m K)
je:	$Pr = \dfrac{871 \cdot 1\,850 \cdot 15{,}0 \cdot 10^{-6}}{0{,}144}$	$= 167{,}8$ (–).

[1)] Podatci desno od vertikalne crte su dani u SI jedinicama. Pri uporabi SI jedinica nije potrebna dimenzijska kontrola.

PRVI DIO

MATEMATIKA

Matematički znakovi

=	jednako
≡	istovjetno, identično
≠	nije jednako
≈	približno jednako
∼	slično
≅	sukladno, kongruentno
⊥	okomito
∥	usporedno, paralelno
#	paralelno i jednako
<	manje od
>	veće od
≤	manje ili jednako
≥	veće ili jednako
∞	beskonačno
const	konstantno
∢	kut
⌒	luk
+	plus – zbrajanje
−	minus – oduzimanje
· , ×	puta – množenje
:	dijeljenje
—	razlomačka crta
/	kosa razlomačka crta
()	okrugla zagrada
[]	uglata zagrada
{}	vitičasta zagrada
...	od – do
... (	od – do isključivo
...)	od isključivo do
%	postotak, procent
‰	promil
ppm	milijuntinka (partes pro millione)

$\lvert a \rvert$	apsolutna vrijednost
a^m	a na (potenciju) m
$\sqrt{\ }$	kvadratni korijen
$\sqrt[n]{\ }$	n-ti korijen
$\log_b$	logaritam za bazu b
lg	dekadni logaritam
ln	prirodni logaritam
arc	arkus
sin	sinus
cos	kosinus
tan	tangens
cot	kotangens
!	faktorijela
$\binom{a}{b}$	a povrh b
i	imaginarna jedinica ($i^2 = -1$)
lim	limes
→	teži k
$f()$	funkcija
Δ	razlika
d	diferencijal
$y' = \dfrac{dy}{dx}$	prva derivacija
$y'' = \dfrac{d^2y}{dx^2}$	druga derivacija
$\dfrac{\partial}{\partial x}$	parcijalna derivacija
$\sum$	suma, zbroj
$\int$	integral
$\vec{a}$, $\boldsymbol{a}$	oznake vektora [1)]

[1)] U ovom su priručniku vektori označeni debljim tiskom.

Posebni matematički znakovi

∈ je element skupa	($a \in A$: a je element skupa A)
∉ nije element skupa	($b \notin A$: b nije element skupa A)
⊂ sadržan u skupu	($A \subset B$: skup A sadržan je u skupu B)
∪ unija skupova	($A \cup B$: unija skupova A i B sadrži sve elemente, koji su ili u skupu A ili u skupu B)
∩ presjek skupova	($A \cap B$: presjek skupova A i B sadrži sve one elemente, koji su ujedno i u A i u B)

*

∇ nabla (Hamiltonov operator deriviranja) Δ Laplaceov operator

*

N skup prirodnih brojeva **N** = {1, 2, 3, ...}
Z skup cijelih brojeva **Z** = {0,1, -1, 2, -2, ...}
R skup realnih brojeva (racionalni i iracionalni brojevi)
Q skup racionalnih brojeva (razlomci) **Q** = $\{m/n;\ m, n \in \mathbf{Z};\ n \neq 0\}$

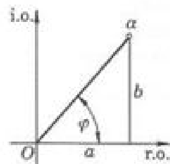
Iracionalni su svi realni brojevi koji nisu racionalni (mogu se prikazati kao neperiodični beskonačni decimalni razlomci), npr. $\sqrt{2}$, π, e

C skup kompleksnih brojeva **C** = $a + bi$
i imaginarna jedinica ($i^2 = -1$)
a realni dio, b imaginarni dio } $a, b \in \mathbf{R}$

Kompleksni brojevi

Kompleksni broj α:

$$\alpha = a + bi$$



Potencije imaginarne jedinice:

$$i^1 = i, \quad i^2 = -1, \quad i^3 = -1, \quad i^4 = 1, \quad i^5 = i \dots$$

φ je argument kompleksnog broja i određen je jednakostima $\tan\varphi = b/a$, $\sin\varphi = \dfrac{a}{|\alpha|}$, $|\alpha|$ je modul kompleksnog broja i vrijedi $|\alpha| = \sqrt{a^2 + b^2}$.

Za kompleksni broj $\alpha = a + bi$ konjugirano kompleksni broj je $\bar{\alpha} = a - bi$.

Za kompleksne brojeve $\alpha = a + bi$ i $\beta = c + di$ vrijedi

$$\alpha \pm \beta = (a \pm c) + (b \pm d)\,i$$

$$\alpha\beta = (ac - bd) + (ad + bc)\,i$$

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}\,i \qquad (\beta \neq 0)$$

Trigonometrijski oblik kompleksnog broja je $\alpha = |\alpha|(\cos\varphi + i\sin\varphi)$. Ako je $\beta = |\beta|(\cos\psi + i\sin\psi)$ onda vrijedi

$$\alpha \cdot \beta = |\alpha| \cdot |\beta| (\cos(\varphi + \psi) + i\sin(\varphi + \psi)),$$

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{|\alpha|}{|\beta|} (\cos(\varphi - \psi) + i\sin(\varphi - \psi)).$$

Za potenciranje i korijenovanje vrijede ove Moivreove formule:

$$\alpha^n = |\alpha|^n (\cos n\varphi + i\sin n\varphi),$$

$$\sqrt[n]{\alpha} = \sqrt[n]{|\alpha|}\left(\cos\frac{\varphi + 2k\pi}{n} + i\sin\frac{\varphi + 2k\pi}{n}\right), \qquad k = 0, 1, \dots, n - 1.$$

RAČUNANJE S POTENCIJAMA I KORIJENIMA

Potencije

$a^n = a \cdot a \cdot a \cdots a$ (n-puta)
a osnova, baza
n eksponent

$a^0 = 1 \quad a \neq 0$

$a^1 = a$

Korijeni

$\sqrt[n]{a} = a^{1/n}$
a radikand
n eksponent korijena

$\sqrt[1]{a} = a$

$$\lim_{n \to \infty} a^n = \begin{matrix} 0 \text{ za } 0 < a < 1 \\ \infty \text{ za } a > 1 \end{matrix}$$

Parni (taki) eksponent ($a > 0$)

$(\pm a)^{2n} = +a^{2n}$

$\sqrt[2n]{+a} = \sqrt[2n]{a}$

$\sqrt[2n]{-a} = i\sqrt[2n]{a}$

Neparni (lihi) eksponenti ($a > 0$)

$(\pm a)^{2n+1} = \pm a^{2n+1}$

$\sqrt[2n+1]{\pm a} = \pm\sqrt[2n+1]{a}$

*

$a^{-n} = \dfrac{1}{a^n}$	$a^{-1/n} = \dfrac{1}{\sqrt[n]{a}}$
$a^{mn} = (a^m)^n = (a^n)^m$	$a^{m/n} = \sqrt[n]{a^m} = (\sqrt[n]{a})^m$
$a^m a^n = a^{m+n}$	
$\dfrac{a^m}{a^n} = a^{m-n}$	$\sqrt[m]{\sqrt[n]{a}} = (a^{1/n})^{1/m} = a^{1/mn} = \sqrt[mn]{a}$
$a^n b^n = (ab)^n$	$\sqrt[n]{a}\,\sqrt[n]{b} = \sqrt[n]{ab}$
$\dfrac{a^n}{b^n} = \left(\dfrac{a}{b}\right)^n$	$\dfrac{\sqrt[n]{a}}{\sqrt[n]{b}} = \sqrt[n]{\dfrac{a}{b}}$

$$0^n = 0 \qquad \sqrt[n]{0} = 0$$

$$\lim_{n \to 0} \frac{1}{n} = \infty \qquad \lim_{n \to \infty} \frac{1}{n} = 0$$

Neodređeni izrazi: $1^\infty, 0^0, \infty^0, 0/0, \infty/\infty, 0 \cdot \infty, \infty - \infty$.

APSOLUTNA I SREDNJA VRIJEDNOST

Apsolutna vrijednost

Definicija apsolutne vrijednosti $|a|$ realnog broja a glasi:

$$|a| = \begin{cases} a \text{ za } a \geq 0 \\ -a \text{ za } a < 0 \end{cases}$$

Apsolutna vrijednost kompleksnog broja α definirana je jednadžbom:

$$|\alpha| = +\sqrt{\alpha\overline{\alpha}} = +\sqrt{a^2 + b^2} \qquad \alpha = a + b\,\mathrm{i}$$

$$|\alpha| = |-\alpha| \qquad \overline{\alpha} = a - b\,\mathrm{i}$$

Za proizvoljne kompleksne brojeve α i β vrijedi:

$$|\alpha\beta| = |\alpha||\beta| \qquad ||\alpha| - |\beta|| \leq |\alpha + \beta| \leq |\alpha| + |\beta|$$

Srednje vrijednosti

Za n realnih brojeva $a_1, a_2, ..., a_n$ bit će:

aritmetička sredina A

$$A = \frac{1}{n}(a_1 + a_2 + ... + a_n)$$

geometrijska sredina G

$$G = \sqrt[n]{a_1 \cdot a_2 \cdot ... \cdot a_n} \qquad a_1, ..., a_n > 0$$

harmonijska sredina H

$$H = \frac{1}{n}\left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + ... + \frac{1}{a_n}\right) \qquad a_1, ..., a_n \neq 0.$$

BINOMNE FORMULE

$$(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2$$

$$(a \pm b)^3 = a^3 \pm 3a^2b + 3ab^2 \pm b^3$$

$$(a \pm b)^n = a^n \pm \binom{n}{1}a^{n-1}b + ... + (-1)^k\binom{n}{k}a^{n-k}b^k + ... + (-1)^n b^n$$

$$\binom{n}{k} = \frac{n(n-1)(n-2)\,...\,(n-k+1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot ... \cdot k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

$$n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot ... \cdot n, \qquad n = 1, 2, 3, ...$$

$$a^2 + b^2 = (a + \mathrm{i}b)(a - \mathrm{i}b)$$

$$a^2 - b^2 = (a + b)(a - b)$$

$$a^3 \pm b^3 = (a \pm b)(a^2 \mp ab + b^2)$$

KOMBINATORIKA

Broj permutacija (poredaka) skupa od n različitih elemenata:

$$P(n) = n! = 1.2.3\,...\,n.$$

Primjer: broj permutacija elemenata a, b i c ($n = 3$):

$$P(3) = 3! = 6, \; abc, acb, bac, bca, cab, cba.$$

Broj permutacija skupa od n elemenata, među kojima je m jednakih:

$$P(n) = \frac{n!}{m!}.$$

Primjer: broj permutacija elemenata a, b i b među kojima su dva jednaka (n=3, m=2):

$$P(3) = \frac{3!}{2!} = 3, \quad abb, bab, bba.$$

Broj kombinacija skupa od n elemenata r-tog razreda:

bez ponavljanja $\quad K_r(n) = \binom{n}{r} = \frac{n!}{r!\,(n-r)!}$

s ponavljanjem $\quad K_r(n) = \binom{n+r-1}{r} = \frac{(n+r-1)!}{r!\,(n-1)!}$.

Primjer: broj kombinacija drugog razreda elemenata a, b i c ($n = 3$, $r = 2$):

bez ponavljanja $\quad K_2(3) = \frac{3!}{2!\,(3-2)!} = 3 \quad ab, ac, bc$

s ponavljanjem $\quad K_2(3) = \frac{(3+2-1)!}{2!\,(3-1)!} = 6 \quad ab, ac, bc, aa, bb, cc.$

Broj varijacija skupa od n elemenata r-tog razreda:

bez ponavljanja $\quad V_r(n) = \binom{n}{r}r! = \frac{n!}{(n-r)!}$

s ponavljanjem $\quad V_r(n) = n^r$.

Primjer: broj varijacija drugog razreda elemenata a, b i c ($n = 3$, $r = 2$):

bez ponavljanja $V_2(3) = \dfrac{3!}{(3-2)!} = 6$ ab, ba, ac, ca, bc, cb

s ponavljanjem $V_2(3) = 3^2 = 9$ $ab, ba, ac, ca, bc, cb, aa, bb, cc.$

NIZOVI I REDOVI

Niz: $a_1, a_2, a_3, ..., a_n, ...$.

Red: $a_1 + a_2 + a_3 + ... + a_n + ... = \sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

Aritmetički niz

$$a, a + d, a + 2d, a + 3d, ..., a + (n-1)\,d, ...$$

$$d = a_n - a_{n-1} = (a_n - a_1)/(n-1) = \text{const.}$$

Opći član: $a_n = a_1 + (n-1)d.$

Suma n članova aritmetičkog niza:

$$s_n = \frac{n}{2}(a_1 + a_n) = \frac{n}{2}[2a_1 + (n-1)d]\,.$$

Neke sume: $s_1 = 1 + 2 + 3 + ... + n = \dfrac{n}{2}(1 + n)$

$$s_2 = 1^2 + 2^2 + 3^3 + ...\ n^2 = \frac{1}{6}n(n+1)(2n+1)$$

$$s_3 = 1^3 + 2^3 + 3^3 + ... + n^3 = \frac{1}{4}n^2(n+1)^2\,.$$

Geometrijski niz

$$a_1, a_1 q, a_1 q^2, a_1 q^3, ...\ a_1 q^{n-1}, ...$$

$$q = a_n/a_{n-1} = \sqrt[n-1]{a_n/a_1} = \text{const.}$$

Opći član: $a_n = a_1 q^{n-1}.$

Suma n članova geometrijskog niza:

$$s_n = a_1 \frac{q^n - 1}{q - 1}\,.$$

Važniji redovi

$$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + ... + \frac{1}{n} ... \quad \text{nema konačne sume}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n(n+1)} = \frac{1}{1\cdot 2} + \frac{1}{2\cdot 3} + \frac{1}{3\cdot 4} + ... + \frac{1}{n(n+1)} + ... = 1$$

$$\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{2^n} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + ... + \frac{1}{2^n} + ... = 2$$

$$\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{n!} = 1 + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + ... + \frac{1}{n!} + ... = e \ (0! = 1)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n}{n!} = 1 - \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} - \frac{1}{3!} + ... + \frac{(-1)^n}{n!} = \frac{1}{e}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2} = \frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + ... + \frac{1}{n^2} + ... = \pi^2/6$$

$$\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n-1}\cdot\frac{1}{n^2} = \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2} + ... = \pi^2/12\,.$$

Važniji Taylorovi redovi:

$e^{\pm x} = 1 \pm x/1! + x^2/2! \pm x^3/3! + ...$

$a^x = 1 + \dfrac{\ln a}{1!}x + \dfrac{(\ln a)^2}{2!}x^2 + \dfrac{(\ln a)^3}{3!}x^3 + ... \quad a > 0$

$\ln(1 \pm x) = \pm x - x^2/2 \pm x^3/3 - x^4/4 \pm ... \quad -1 < x < +1$

$\sin x = x/1! - x^3/3! + x^5/5! - x^7/7! + ...$

$\cos x = 1 - x^2/2! + x^4/4! - x^6/6! + ...$

$\dfrac{1}{1 \pm x} = 1 \pm x + x^2 \pm x^3 + ..., \quad -1 < x < 1$

$(1+x)^n = 1 + \dbinom{n}{1}x + \dbinom{n}{2}x^2 + \dbinom{n}{3}x^3 + ..., \quad -1 < x < 1,$

n realni broj.

Kamatno-kamatni račun

Kapital K_0 naraste za n godina uz godišnje kamate od p % na iznos

$$K_n = K_0\, q^n, \quad q = 1 + \frac{p}{100}.$$

Godišnji otpis x % od vrijednosti neke investicije pri njenom trajanju od n godina ako se otpisna svota ulaže u fond za obnovu uz kamate od p % je

$$x = \frac{p}{q^n - 1}.$$

Godišnja amortizacijska kvota (anuitet) a % ako se dug x mora otplaćivati n godina uz p % kamata je

$$a = xq^n.$$

DETERMINANTE

Determinanta 1. reda:

$$\begin{vmatrix} a_{11} \end{vmatrix} = a_{11}.$$

Determinanta 2. reda:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}\, a_{22} - a_{21}\, a_{12}.$$

Determinanta 3. reda:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix}$$

$$= a_{11}\,(a_{22}\, a_{33} - a_{32}\, a_{23}) - a_{12}\,(a_{21}\, a_{33} - a_{31}\, a_{23}) + $$
$$+ a_{13}\,(a_{21}\, a_{32} - a_{31}\, a_{22}).$$

Determinanta 4. reda:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} +$$

$$+ a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{44} \end{vmatrix} - a_{14} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{vmatrix}.$$

Svojstva determinanata

Kofaktorom A_{ik} elementa a_{ik} determinante n-tog reda nazivamo determinantu $(n-1)$-og reda koju dobijemo tako da u determinanti n-tog reda precrtamo i-ti redak i k-ti stupac i tako dobivenu determinantu pomnožimo s $(-1)^{i+k}$.

Primjer za determinantu 3. reda ($n = 3$):

$i = 1, \quad k = 1$: element a_{11}

kofaktor $A_{11} = \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \cdot 1$

$(-1)^{1+1} = 1$

$i = 1, \quad k = 2$: element a_{12}

kofaktor $A_{12} = \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} \cdot (-1)$

$(-1)^{1+2} = -1$

Vrijednost determinante n-tog reda računa se tako da se skalarno pomnože elementi nekog retka (ili stupca) s odgovarajućim kofaktorima elemenata tog retka (ili stupca), npr.:

razvoj po prvom retku

$$D = a_{11}A_{11} + a_{12}A_{12} + a_{13}A_{13} + \ldots + A_{1n}A_{1n}.$$

1. Vrijednost determinante se ne mijenja, ako je transponiramo, tj. ako retke zamijenimo sa stupcima:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{vmatrix}.$$

2. Determinanta mijenja predznak ako u njoj bilo koja dva retka (ili bilo koja dva stupca) zamijene mjesta:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} & a_{12} \\ a_{21} & a_{23} & a_{22} \\ a_{31} & a_{33} & a_{32} \end{vmatrix}.$$

3. Determinanta se množi nekim brojem k tako da s k pomnožimo elemente jednog njenog retka (ili stupca):

$$k \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} ka_{11} & a_{12} & a_{13} \\ ka_{21} & a_{22} & a_{23} \\ ka_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} ka_{11} & ka_{12} & ka_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}.$$

4. Ako su u determinanti dva retka ili dva stupca jednaka ili proporcionalna, vrijednost determinante jednaka je ništici:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = 0 \qquad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{11} & a_{13} \\ a_{21} & a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} = 0 \qquad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & ka_{12} \\ a_{21} & a_{22} & ka_{22} \\ a_{31} & a_{32} & ka_{32} \end{vmatrix} = 0 \,.$$

5. Ako su u determinanti svi elementi jednog retka (ili stupca) jednaki zbroju dvaju pribrojnika onda je determinanta jednaka zbroju dviju determinanti:

$$\begin{vmatrix} a_{11} + b_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} + b_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} + b_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b_{11} & a_{12} & a_{13} \\ b_{21} & a_{22} & a_{23} \\ b_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \,.$$

6. Ako elementima nekog retka (ili stupca) dodamo korespondentne elemente nekog drugog retka (ili stupca) pomnožene istim brojem, onda se vrijednost determinante ne mijenja:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} + ka_{13} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} + ka_{23} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} + ka_{33} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} + ka_{31} & a_{12} + ka_{32} & a_{13} + ka_{33} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \,.$$

MATRICE

Za matricu A kažemo da je tipa (m, n) ako ima m redaka i n stupaca

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{vmatrix} = [a_{ik}]_{m,n}$$

Ako je $n = 1$, matricu zovemo jednostupačnom ili vektorom

$$A = \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_m \end{vmatrix} \,.$$

Dvije su matrice jednake, ako su istog tipa i ako su im odgovarajući elementi jednaki. Matricu kojoj su svi elementi 0 zovemo nulmatricom.

Zbrajati možemo samo matrice istog tipa:

$$A = [a_{ik}]_{m,n} \qquad B = [b_{ik}]_{m,n}$$

$$A + B = [a_{ik} + b_{ik}]_{m,n} \,.$$

Matricu $A = [a_{ik}]_{m,n}$ množimo sa skalarom k (realnim brojem) tako, da svaki element u matrici pomnožimo s k

$$k\,A = [k\,a_{ik}]_{m,n} \,.$$

Umnožak matrica $A = [a_{ik}]_{m,n}$ i $B = [b_{ik}]_{n,p}$ je matrica

$$C = A\,B = [c_{ik}]_{m,p}$$

gdje je: $c_{ik} = a_{i1}\,b_{1k} + a_{i2}\,b_{2k} + \dots + a_{in}\,b_{nk}$.

Iz elemenata matrice $A = [a_{ik}]_{m,n}$ možemo precrtavanjem redaka ili stupaca tvoriti različite determinante.

Ako u matrici $A = [a_{ik}]_{m,n}$ zamijenimo retke sa stupcima onda dobivamo njoj pridruženu transponiranu matricu $A' = [b_{ik}]_{m,n}$, $b_{ik} = a_{ki}$.

Ako je $m = n$, matrica je kvadratna. Svakoj je kvadratnoj matrici pridružena njena determinanta. Matrica A je regularna, ako je njena determinanta različita od 0.

Kvadratna matrica je simetrična, ako je $A' = A$, a antisimetrična, ako je $A' = -A$.

Matrica $A = [a_{ik}]_{m,n}$ je r-tog ranga, ako je barem jedna determinanta r-tog reda matrice A različita od 0, a sve determinante višeg reda su jednake 0.

Rang matrice se ne mijenja, ako:
- međusobno zamijenimo dva stupca (dva retka),
- elemente nekog stupca (retka) pomnožimo brojem k ($k \neq 0$),
- stupac (redak) pomnožimo proizvoljnim brojem te ga pribrojimo k drugom (stupcu) retku.

SUSTAVI LINEARNIH JEDNADŽBI

Sustav n jednadžbi s nepoznanicama $x_1, x_2, \dots, x_n$

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{12}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n &= b_n \,. \end{aligned}$$

Sustav je homogen, ako je $b_1 = b_2 = \dots = b_n = 0$. Ako je barem i jedan $b_k \neq 0$, sustav nehomogen.

Nehomogen sustav ima jedinstveno rješenje, ako je determinanta sustava

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ & \cdot & & \\ & \cdot & & \\ & \cdot & & \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix} \neq 0 \,.$$

Rješenje sustava glasi tada:

$$x_1 = \frac{A_1}{A}, \quad x_2 = \frac{A_2}{A}, \quad \ldots, \quad x_n = \frac{A_n}{A}.$$

gdje su:

$$A_1 = \begin{vmatrix} b_1\, a_{12} \ldots a_{1n} \\ b_2\, a_{22} \ldots a_{2n} \\ \vdots \\ b_n\, a_{n2} \ldots a_{nn} \end{vmatrix} \quad A_2 = \begin{vmatrix} a_{11}\, b_1 \ldots a_{1n} \\ a_{21}\, b_2 \ldots a_{2n} \\ \vdots \\ a_{n1}\, b_n \ldots a_{nn} \end{vmatrix} \quad A_n = \begin{vmatrix} a_{11}\, a_{12} \ldots b_1 \\ a_{21}\, a_{22} \ldots b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}\, a_{n2} \ldots b_n \end{vmatrix}.$$

Za nehomogen sustav dviju linearnih jednadžbi s dvije nepoznanice

$$a_1 x + b_1 y = c_1$$
$$a_2 x + b_2 y = c_2,$$

uz uvjet $$A = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = a_1 b_2 - a_2 b_1 \neq 0$$

rješenje glasi:

$$x = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{A} = \frac{b_2 c_1 - b_1 c_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \qquad x = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{A} = \frac{a_1 c_2 - a_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}.$$

Homogeni sustav ima očito trivijalno rješenje $x_1 = x_2 = \ldots = x_n = 0$. Netrivijalno rješenje ima samo onda ako je determinanta sustava $A = 0$.

LOGARITMI

Logaritmiranje je računska operacija, pri kojoj tražimo eksponent b iz poznate potencije c i baze a

$$a^b = c.$$

Broj b je logaritam broja c za bazu a

$$b = \log_a c$$

(gdje su a i c pozitivni brojevi).

Za bilo koju bazu $a > 0$, $a \neq 1$ vrijedi:

$$\log_a a = 1$$
$$\log_a 1 = 0$$

$$\lim_{x \to 0} \log x = \begin{matrix} -\infty & \text{za} & a > 1 \\ +\infty & \text{za} & 0 < a < 1 \end{matrix}$$

$$\lim_{x \to \infty} \log x = \begin{matrix} +\infty & \text{za} & a > 1 \\ -\infty & \text{za} & 0 < a < 1 \end{matrix}$$

Računanje s logaritmima

$$\log_a (uv) = \log_a u + \log_a v$$
$$\log_a \frac{u}{v} = \log_a u - \log_a v$$
$$\log_a u^v = v \log_a u$$
$$\log_a \sqrt[v]{u} = \frac{1}{v} \log_a u.$$

Primjer:

$$\log \frac{2a^3 \sqrt{b}}{3c^2 d} = \log (2a^3 \sqrt{b}) - \log (3c^2 d)$$
$$= \log 2 + 3 \log a + \frac{1}{2} \log b - \log 3 - 2 \log c - \log d.$$

Pretvaranje logaritama

$$\log_a u = M \log_b u \qquad (M \text{ je modul pretvorbe}).$$

U uporabi su dekadni (Briggsovi) logaritmi s bazom $a = 10$ i prirodni logaritmi s bazom $a = e$ ($e = 2{,}718\,282\ldots$).

Dekadni (Briggsovi) logaritmi

imaju bazu $a = 10$.

Označujemo ih $\log_{10} u = \lg u$

npr. $\lg 10 = 1 \qquad \log \frac{1}{10} = -1 \qquad \lg 10^n = n.$

Svaki se dekadni logaritam sastoji od:

a) *karakteristike* (cijelog broja u logaritmu), tj. potencije broja 10, koja odgovara mjesnoj vrijednosti prve brojke u danom broju u;

b) *mantise* (decimale u logaritmu), koje se za redoslijed brojaka u danom broju u potraže u tablicama.

Primjer:

u	Karakteristika	Mantisa	$\lg u$
642	$\lg 10^2 = 2$	..8075	2,8075
64,2	$\lg 10^1 = 1$		1,8075
6,42	$\lg 10^0 = 0$		0,8075
0,642	$\lg 10^{-1} = -1$	(očita se iz tablica	0,8075 – 1
0,0642	$\lg 10^{-2} = -2$	za broj 64 pod 2)	0,8075 – 2

Prirodni logaritmi

imaju bazu $a = e = 2{,}718\ 282\ ...$

Označujemo ih $\log_e u = \ln u$

npr. $\ln e = 1 \quad \ln \frac{1}{e} = -1 \quad \ln e^n = n.$

*

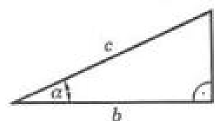
Odnos dekadnih i prirodnih logaritama istog broja

$$\lg u = 0{,}4343 \ln u \qquad \ln u = 2{,}3026 \lg u$$

Izračunavanje prirodnih logaritama iz dekadnih

$$\ln 6{,}42 = 2{,}3026 \cdot \lg 6{,}42 = 2{,}3026 \cdot 0{,}8075 = 1{,}8593.$$

TRIGONOMETRIJSKE FUNKCIJE



U pravokutnom su trokutu:

katete – stranice a i b uz pravi kut,
hipotenuza – stranice c nasuprot pravom kutu.

Trigonometrijske funkcije kuta su omjeri stranica pravokutnog trokuta:

sinus $\sin a = a/c$ tangens $\tan a = a/b$
kosinus $\cos a = b/c$ kotangens $\cot a = b/a$

Vrijednosti trigonometrijskih funkcija češće potrebnih kutova

$\alpha =$ ° / rad	0° / 0	30° / $\pi/6$	45° / $\pi/4$	60° / $\pi/3$	90° / $\pi/2$	180° / π	270° / $3\pi/2$	360° / 2π
$\sin\alpha =$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	1	0	−1	0
$\cos\alpha =$	1	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	$\frac{1}{2}$	0	−1	0	1
$\tan\alpha =$	0	$\frac{1}{3}\sqrt{3}$	1	$\sqrt{3}$	$\pm\infty$	0	$\pm\infty$	0
$\cot\alpha =$	$\pm\infty$	$\sqrt{3}$	1	$\frac{1}{3}\sqrt{3}$	0	$\pm\infty$	0	$\pm\infty$

Formule za svođenje na prvi kvadrant

$\varphi =$ ° / rad	$\pm\alpha$ / $\pm\alpha$	$90° \pm \alpha$ / $(\pi/2) \pm \alpha$	$180° \pm \alpha$ / $\pi \pm \alpha$	$270° \pm \alpha$ / $(3\pi/2) \pm \alpha$	$360° \pm \alpha$ / $2\pi \pm \alpha$
$\sin\varphi =$	$\pm\sin\alpha$	$+\cos\alpha$	$\mp\sin\alpha$	$-\cos\alpha$	$\pm\sin\alpha$
$\cos\varphi =$	$+\cos\alpha$	$\mp\sin\alpha$	$-\cos\alpha$	$\pm\sin\alpha$	$+\cos\alpha$
$\tan\varphi =$	$\pm\tan\alpha$	$\mp\cot\alpha$	$\pm\tan\alpha$	$\mp\cot\alpha$	$\pm\tan\alpha$
$\cot\varphi =$	$\pm\cot\alpha$	$\mp\tan\alpha$	$\pm\cot\alpha$	$\mp\tan\alpha$	$\pm\cot\alpha$

Osnovni odnosi među trigonometrijskim funkcijama

$\sin^2 + \cos^2 = 1$ $\qquad \sin\alpha = \pm\sqrt{1-\cos^2\alpha}$

$\tan\alpha = \sin\alpha/\cos\alpha$ $\qquad \cos\alpha = \pm\sqrt{1-\sin^2\alpha}$

$\cot\alpha = \cos\alpha/\sin\alpha$ $\qquad 1 + \tan^2\alpha = 1/\cos^2\alpha$

$\tan\alpha \cot\alpha = 1$ $\qquad 1 + \cot^2\alpha = 1/\sin^2\alpha$

Važnije formule

Adicijske formule:

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin\alpha\cos\beta \pm \cos\alpha\sin\alpha$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos\alpha\cos\beta \mp \sin\alpha\sin\beta$$

$$\tan(\alpha \pm \beta) = \frac{\tan\alpha \pm \tan\beta}{1 \mp \tan\alpha\tan\beta}$$

$$\cot(\alpha \pm \beta) = \frac{\cot\alpha\cot\beta \mp \tan\beta}{\cot\beta \pm \cot\alpha}$$

Za $\alpha = \beta$ vrijedi:

$$\sin 2\alpha = 2\sin\alpha\cos\alpha$$
$$\cos 2\alpha = \cos^2\alpha - \sin^2\alpha$$
$$\tan 2\alpha = 2\tan\alpha/(1-\tan^2\alpha)$$
$$\cot 2\alpha = (\cot^2\alpha - 1)/2\cot\alpha$$

Nadalje vrijedi:

$$\sin 3\alpha = 3\sin\alpha - 4\sin^3\alpha$$
$$\cos 3\alpha = 4\cos^3\alpha - 3\cos\alpha$$
$$2\sin^2\alpha = 1 - \cos 2\alpha$$
$$2\cos^2\alpha = 1 + \cos 2\alpha$$

Zbrojevi i razlike trigonometrijskih funkcija:

$$\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$\sin\alpha - \sin\beta = 2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$\cos\alpha - \cos\beta = -2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$\tan\alpha \pm \tan\beta = \frac{\sin(\alpha\pm\beta)}{\cos\alpha\cos\beta}$$

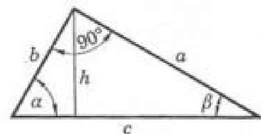
$$\cot\alpha \pm \cot\beta = \frac{\sin(\beta\pm\alpha)}{\sin\alpha\sin\beta}$$

$$2\sin\alpha\sin\beta = -\cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)$$

$$2\sin\alpha\cos\beta = \sin(\alpha+\beta) + \sin(\alpha-\beta)$$

$$2\cos\alpha\cos\beta = \cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)$$

Izračunavanje stranica i kutova trokuta



a) *Pravokutni trokut* ($\gamma = 90°$)

$\alpha + \beta = 90°$

$a/c = \sin\alpha = \cos\beta = h/b$

$b/c = \cos\alpha = \sin\beta = h/a$

$a/b = \tan\alpha = \cot\beta$

$b/a = \cot\alpha = \tan\beta$

Visina na hipotenuzu $h = ab/c$ Pitagorin poučak $a^2 + b^2 = c^2$

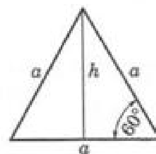
Poznato	Tražimo	
a, b	$c = \sqrt{a^2+b^2}$ $\tan\alpha = a/b$ $\tan\beta = b/a$	$h = ab/\sqrt{a^2+b^2}$ $\beta = 90° - \alpha$
a, c	$b = \sqrt{c^2-a^2}$ $\sin\alpha = a/c$ $\cos\beta = a/c$	$h = (a/c)\sqrt{c^2-a^2}$ $\beta = 90° - \alpha$
b, c	$a = \sqrt{c^2-b^2}$ $\cos\alpha = b/c$ $\sin\beta = b/c$	$h = (b/c)\sqrt{c^2-b^2}$ $\beta = 90° - \alpha$
a, α	$b = a/\tan\alpha = a\cot\alpha$ $c = a/\sin\alpha$	$h = a\cos\alpha$ $\beta = 90° - \alpha$
b, α	$a = b\tan\alpha = b/\cot\alpha$ $c = b/\cos\alpha$	$h = b\sin\alpha$ $\beta = 90° - \alpha$
c, α	$a = c\sin\alpha$ $b = c\cos\alpha$	$h = (c/2)\sin 2\alpha$ $\beta = 90° - \alpha$

b) *Istostranični trokut*

$a = (b) = (c)$

$\alpha = (\beta) = (\gamma) = 60°$

$h = \frac{a}{2}\sqrt{3} = 0{,}866\,a$



c) *Kosokutni trokut*

$\alpha + \beta + \gamma = 180°$

$\sin\alpha = \sin(\beta + \gamma)$

$\cos\alpha = -\cos(\beta + \gamma)$



Sinusov poučak $a/\sin\alpha = b/\sin\beta = c/\sin\gamma$

Kosinusov poučak
$a^2 = b^2 + c^2 - 2\,bc\cos\alpha$
$b^2 = a^2 + c^2 - 2\,ac\cos\beta$
$c^2 = a^2 + b^2 - 2\,ab\cos\gamma$

Poučak o projekcijama
$a = b\cos\gamma + c\cos\beta$
$b = a\cos\gamma + c\cos\alpha$
$c = b\cos\alpha + a\cos\beta$

Visina (nad stranicom c) $h = a\sin\beta = b\sin\alpha$

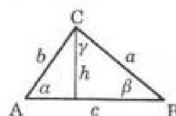
Poznato	Tražimo
a, b, c	$\cos\alpha = (b^2 + c^2 - a^2)/2\,bc$ $\cos\beta = (a^2 + c^2 - b^2)/2\,ac$ $\cos\gamma = (a^2 + b^2 - c^2)/2\,ab$ $\gamma = 180° - (\alpha + \beta)$
a, b, γ	$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma}$ $\tan\alpha = a\sin\gamma/(b - a\cos\gamma)$ $\tan\beta = b\sin\gamma/(a - b\cos\gamma)$ $\beta = 180° - (\alpha + \gamma)$
a, b, α	$c = b\cos\alpha \pm \sqrt{a^2 - b^2\sin^2\alpha}$ 1 realno rješenje za: $a = b\sin\alpha$ 2 realna rješenja za: $a > b\sin\alpha$ $\sin\beta = (b/a)\sin\alpha$ $\gamma = 180° - (\alpha + \beta)$
a, β, γ	$b = a\sin\beta/\sin(\beta + \gamma)$ $c = a\sin\gamma/\sin(\beta + \gamma)$ $\alpha = 180° - (\beta + \gamma)$

LIKOVI I TIJELA

Površine i opsezi likova

A – površina $\qquad O$ – opseg

1. *Trokuti*



Stranice	a, b, c
Kutovi	α, β, γ
Zbroj kutova	$\alpha + \beta + \gamma = 180°$
Visina na c	$h = a \sin \beta, \quad (h \perp c)$
Koordinate vrhova	$A(x_A, y_A), B(x_B, y_B), C(x_C, y_C),$

$A = hc/2$

$A = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \qquad 2s = a + b + c$

$A = 1/2 \cdot ab \sin \gamma = 1/2 \cdot ac \sin \beta = 1/2 \cdot bc \sin \alpha$

$A = 1/2 \cdot [x_A(y_B - y_C) + x_B(y_C - y_A) + x_C(y_A - y_B)]$

$O = a + b + c = 2s.$

2. *Četverokuti*

Stranice $a, b, (c, d)$ $\qquad$ Dijagonala D

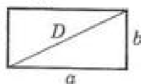
Kutovi $\alpha, \beta, (\gamma, \delta)$ $\qquad$ Visina h



Kvadrat $\quad a\ (= b) = h, \qquad \alpha = 90°$

$A = a^2$

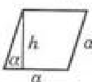
$O = 4a \qquad D = a\sqrt{2}.$



Pravokutnik $a \neq b = h,\ \alpha = 90°$

$A = ab$

$O = 2(a + b), \quad D = \sqrt{a^2 + b^2}.$



Romb $a\ (= b) \neq h,\ \alpha \neq 90°$

$A = ah = a^2 \sin \alpha$

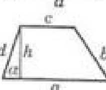
$O = 4a \qquad h = a \sin \alpha.$



Paralelogram $a \neq b \neq h,\ \alpha \neq 90°$

$A = ah = ab \sin \alpha$

$O = 2(a + b), \quad h = b \sin \alpha.$



Trapez $a \neq b \neq c \neq d\ (a \parallel c)$

$$A = \frac{a+c}{2} h = \frac{a+c}{2} d \sin \alpha$$

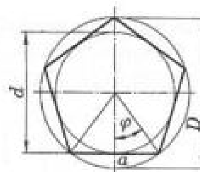
$$O = a + b + c + d \qquad h = d \sin \alpha.$$

3. *Višekuti* (poligoni)

Broj stranica n. $\qquad$ Zbroj unutarnjih kutova $180°\ (n - 2)$.

Površinu određujemo rastavljanjem višekuta na trokute. Opseg je zbroj duljina svih stranica.

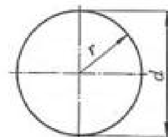
4. *Pravilni višekuti* sa n stranica



Središnji kut	$2\varphi = 2\pi/n \quad \hat{\varphi}$ (rad)
	$2\varphi = 360°/n$
Površina	$A = n(a^2/4) \cot \varphi$
Opseg	$O = na$
Promjer opisane kružnice	$D = a/\sin \varphi$
Promjer upisane kružnice	$d = a/\tan \varphi$

Pravilni višekuti	n	$\hat{\varphi}$	φ	A	O	D	d
trokut	3	$\pi/3$	60°	$0{,}433\,a^2$	$3a$	$1{,}1547\,a$	$0{,}5774\,a$
kvadrat	4	$\pi/4$	45°	a^2	$4a$	$1{,}4142\,a$	a
peterokut	5	$\pi/5$	36°	$1{,}7205\,a^2$	$5a$	$1{,}7013\,a$	$1{,}3764\,a$
šesterokut	6	$\pi/6$	30°	$2{,}5981\,a^2$	$6a$	$2a$	$1{,}7321\,a$
osmerokut	8	$\pi/8$	22,5°	$4{,}8284\,a^2$	$8a$	$2{,}6132\,a$	$2{,}4142\,a$

5. *Krug*



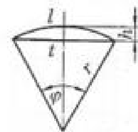
Polumjer r, promjer d

$A = r^2\pi = d^2\pi/4$

$O = 2r\pi = d\pi$ (= duljina kružnice).

Kružni isječak i odsječak

Polumjer r, središnji kut $\varphi \qquad \hat{\varphi}$ (rad)



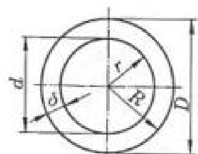
Luk $l = r\hat{\varphi} \qquad$ Tetiva $t = 2r \sin \dfrac{\varphi}{2}$

Visina odsječka $\qquad h = r\left(1 - \cos\dfrac{\varphi}{2}\right)$

Površina odsječka $\qquad A_o = \dfrac{r^2}{2}(\hat{\varphi} - \sin \varphi)$

Površina isječka $\qquad A_i = \dfrac{r^2}{2}\hat{\varphi} = \dfrac{lr}{2}.$

Kružni vijenac



Vanjski i unutarnji polumjer R, r

Vanjski i unutarnji promjer D, d

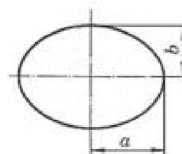
$A = (R^2 - r^2)\pi = (D^2 - d^2)\pi/4.$

Širina vijenca $\delta = R - r$

Srednji polumjer $\varrho = (R + r)/2$

$A = 2\varrho\pi\delta.$

6. *Elipsa*



Poluosi a, b

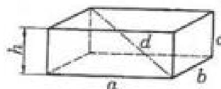
$A = ab\pi$

$O = \pi\,[1{,}5(a + b) - \sqrt{ab}]\,.$

Oplošja i obujmovi tijela

V obujam, volumen, A_0 površina osnovke (baze), A_p površina plašta, A oplošje (ukupna površina), h visina

1. *Prizma*



$V = A_0 h.$

Pravokutni paralelepiped sa stranicama a, b, c

$V = a\,b\,c,\qquad A = 2\,(ab + ac + bc).$

Dijagonala $\qquad d = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}.$

Kocka s bridom a

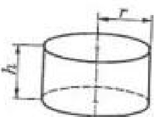
$V = a^3,\qquad A_0 = a^2,\qquad h = a,$

$A = 6\,a^2.$

Dijagonala $\qquad d = a\sqrt{3}.$

2. *Valjak*

$V = A_0 h.$



Uspravni valjak s polumjerom r

$V = r^2 \pi\, h,\qquad A_0 = r^2 \pi,$

$A = 2\,r\,\pi\,(r + h).$

Šuplji valjak s polumjerima R i r

$V = (R^2 - r^2)\,\pi\, h,\qquad A_0 = (R^2 - r^2)\,\pi.$

Šuplji valjak s tankom stijenkom

Debljina stijenke $\qquad \delta = R - r.$

Srednji polumjer $\qquad \varrho = \dfrac{R + r}{2}.$

$V = 2\,\varrho\,\pi\,\delta\, h,\qquad A_0 = 2\,\varrho\,\pi\,\delta.$

3. *Piramida*

$V = \dfrac{1}{3} A_0\, h.$

Kvadratna piramida sa stranicom osnovke a i visinom h

$V = a^2 h/3.$

Kut α između osnovke i pobočke

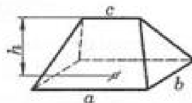
$\tan\alpha = 2\,h/a.$

Prikraćena (krnja) kvadratna piramida sa stranicama osnovki a i b i visinom h

Visina piramide $h = H\,(a - b)/a,$

$V = h(a^2 + ab + b^2)/3.$

4. *Klin*



Stranice osnovke a, b

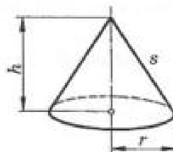
Greben c

$V = (2a + c)\,bh/6,$

$A_p = (a + c)\sqrt{h^2 + b^2/4} + b\sqrt{h^2 + (a - c)^2/4},$

$A = A_p + ab.$

5. *Stožac*

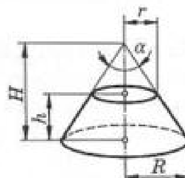


$V = \dfrac{1}{3} r^2 \pi h,\qquad r$ polumjer osnovke,

$A_p = r\pi s,\qquad s = \sqrt{r^2 + h^2},$

$A = r\pi(s + r).$

Prikraćeni (krnji) stožac



R, r polumjeri osnovki, h visina.

Visina stošca $\qquad H = h\,R/(R - r).$

Kut stošca $\qquad \tan(\alpha/2) = (R - r)/h.$

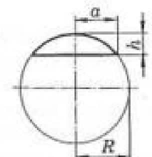
$V = (R^2 + rR + r^2)\pi h/3.$

6. *Kugla* Polumjer R, promjer D

$V = \dfrac{4}{3}\pi R^3 = 4{,}1888\ R^3 = \dfrac{1}{6}\pi D^3 = 0{,}5236\ D^3,$

$A = 4\pi R^2 = \pi D^2.$

Kuglin isječak i odsječak



Visina odsječka (kalote) h

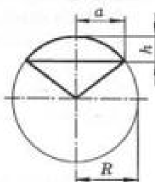
Polumjer kugline paralele

$a = \sqrt{h(2R - h)}.$

Obujam odsječka

$V_0 = \pi h^2\,(R - h/3).$

Obujam isječka



$V_i = \dfrac{2}{3}\pi R^2 h = 2{,}0944\ R^2 h.$

Površina plašta odsječka

$A_p = 2\pi R h.$

Jednadžba n-tog stupnja

$$a_nx^n + a_{n-1}x^{n-1} + ... + a_1x + a_0 = 0, \qquad a_n \neq 0$$

ima u polju kompleksnih brojeva n korijena. Korijene takve jednadžbe određujemo, u općem slučaju, poželjnom točnošću metodama numeričke matematike.

Jednadžba prvog stupnja (linearna jednadžba)

$$ax + b = 0, \qquad a \neq 0$$

ima točno jedno rješenje

$$x = -b/a.$$

Jednadžba drugog stupnja (kvadratna jednadžba)

$$ax^2 + bx + c = 0, \qquad a \neq 0$$

ima dva rješenja

$$x_{1,2} = (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})/2a.$$

Diskriminanta jednadžbe

$$\Delta = b^2 - 4ac.$$

Za $\Delta > 0$ ima jednadžba dva različita realna korijena,

za $\Delta = 0$ ima jednadžba dva jednaka realna korijena,

za $\Delta < 0$ su korijeni jednadžbe konjugirano kompleksni brojevi.

Ako su x_1 i x_2 korijeni jednadžbe $x^2 + px + q = 0$, vrijedi

$$q = x_1 x_2 \quad \text{i} \quad p = -(x_1 + x_2).$$

Jednadžbu višeg stupnja (trećeg, četvrtog ...) rješavamo jednostavno samo ako je možemo rastaviti na faktore.

Sustav dviju linearnih jednadžbi s dvije nepoznanice (x, y)

$$a_1x + b_1y = c_1, \qquad a_2x + b_2y = c_2.$$

Metode rješavanja:

a) *Metoda supstitucije*: iz druge jednadžbe $y = (c_2 - a_2x)/b_2$ uvrštavamo u prvu jednadžbu.

b) *Metoda komparacije*: iz obiju jednadžbi izrazimo y pomoću x i dobivene izraze izjednačimo. Dobivamo jednadžbu $(c_1 - a_1x)/b_1 = (c_2 - a_2x)/b_2$.

c) *Metoda suprotnih koeficijenata*: jednadžbe množimo takvim brojevima, da dobijemo pri članovima s istom nepoznanicom suprotne koeficijente, a potom ih zbrojimo

$$a_1b_2x + b_1b_2y = b_2c_1, \qquad -a_2b_1x - b_1b_2y = -b_1c_2.$$

Rješenje glasi:

$$x = \frac{b_2c_1 - b_1c_2}{a_1b_2 - a_2b_1}.$$

Na isti način izračunavamo nepoznanicu y.

Eksponencijalne jednadžbe

Jednostavna se eksponencijalna jednadžba

$$a^x = b \qquad a > 0, a \neq 1$$

rješava logaritmiranjem (naravnim ili dekadskim logaritmima).

Rješenje glasi: $x = \ln b/\ln a$.

Ako se jednadžba može svesti na oblik $a^{f(x)} = a^u$, onda se njezino rješenje dobiva iz $f(x) = u$.

Primjer: Rješenje jednadžbe $4^{x+1} - 16 = 2 \cdot 2^{2x}$:

$$4 \cdot 2^{2x} - 16 = 2 \cdot 2^{2x}$$
$$2 \cdot 2^{2x} = 16$$
$$2^{2x+1} = 2^4$$
$$2x + 1 = 4$$
$$x = \frac{3}{2}.$$

Logaritamske jednadžbe

Jednostavna logaritamska jednadžba

$$\log_a x = b \qquad a > 0, a \neq 1$$

ima rješenje $x = a^b$.

Primjeri: Rješenje jednadžbe $\lg\sqrt[3]{100} = x$:

$$10^x = \sqrt[3]{100} = 10^{\frac{2}{3}}, \qquad x = 2/3.$$

Rješenje jednadžbe $\ln x^6 = -3$:

$$x^6 = e^{-3}, \qquad x = e^{-1/2} = \sqrt{1/e}.$$

Trigonometrijske jednadžbe

Za rješavanje jednostavnih trigonometrijskih jednadžbi, npr.

$$\sin(mx + n) = a, \qquad m \neq 0,$$

potrebne su tablice vrijednosti trigonometrijskih funkcija ili odgovarajuće računalo. Za jednadžbu $\sin(mx + n) = a$ tražimo iz tablica kut u

$$mx + n = u$$

te dobivamo rješenje: $x = (u - n)/m + 2\pi k, \quad k \in \mathbf{Z}$.

Primjeri: Rješenje jednadžbe $\sin\left(2x + \frac{\pi}{3}\right) = -\sqrt{3}/2$

$$2x_1 + \pi/3 = 4\pi/3 + 2\pi k \qquad x_1 = \pi/2 + \pi k$$
$$2x_2 + \pi/3 = 5\pi/3 + 2\pi k \qquad x_2 = 2\pi/3 + \pi k, \quad k \in \mathbf{Z}.$$

Rješenje jednadžbe $\sin x = \cos x$:

$$\tan x = 1, \qquad x = \pi/4 + \pi k \quad k \in \mathbf{Z}.$$

Numeričko rješavanje jednadžbi

Općenito korijene jednadžbi nalazimo metodama numeričke matematike.

Realni korijeni jednadžbe $f(x) = 0$ mogu se odrediti numeričkim metodama tako da redom određujemo njihove sve bolje i bolje aproksimacije. Ako je funkcija $f(x)$ neprekidna, onda je vrlo ugodna metoda bisekcije. Najprije odredimo donju aproksimaciju x_s i gornju aproksimaciju x_z tako da su funkcijske vrijednosti $f(x_s)$ i $f(x_z)$ suprotnog predznaka. Tada je korijen jednadžbe u intervalu (x_s, x_z). Polovište $x_1 = (x_s + x_z)/2$ tog intervala određuje podintervale (x_s, x_1) i (x_1, x_z). Uzimamo onaj od tih podintervala za kojeg funkcija na njegovim krajevima ima funkcijske vrijednosti različitih predznaka. Sa tim podintervalom nastavljamo postupak i nalazimo sve točnije i točnije aproksimacije $x_1, x_2, x_3, \ldots$ korijena jednadžbe $f(x) = 0$.

Funkciju $y = f(x)$ možemo prikazivati i grafički. Njezini se korijeni dobiju za $y = 0$.

NEJEDNADŽBE

Nejednadžba ostaje valjana ako objema stranama dodamo ili oduzmemo isti broj ili ako je pomnožimo ili podijelimo jednim te istim pozitivnim brojem različitim od nule.

Ako nejednadžbu pomnožimo ili podijelimo jednim te istim negativnim brojem različitim od nule onda se znak nejednakosti mijenja u suprotni.

Linearna jednadžba s jednom nepoznanicom

$$ax + b \gtrless 0$$

ima rješenje

$$x \gtrless -\frac{b}{a} \text{ za } a > 0 \qquad x \lessgtr -\frac{b}{a} \text{ za } a < 0.$$

Kvadratna nejednadžba s jednom nepoznanicom

$$ax^2 + bx + c \gtrless 0$$

lako se rješava uporabom grafa funkcije

$$y = ax^2 + bx + c$$

tako da se sa slike toga grafa nađu intervali u kojima je $y \gtrless 0$.

Primjer:

$$(x-2)^2 < (x+4)^2 - 3x$$
$$x^2 - 4x + 4 < x^2 + 8x + 16 - 3x$$
$$-9x < 12$$
$$x > -4/3.$$

VEKTORI

Skalari su veličine potpuno određene samo jednim podatkom (npr. vrijeme, masa, radnja, energija, temperatura itd.).

Skalare označujemo simbolima, npr. a.

Vektori su veličine, određene duljinom (apsolutnom vrijednošću) smjerom i smislom (npr. sila, moment, brzina, ubrzanje itd.).

Vektore označujemo znakovima $\vec{a}$ ili $\boldsymbol{a}$ a geometrijski ih prikazujemo orijentiranim dužinama[1].

Vektori mogu biti *slobodni* ili *vezani*. Slobodni se vektori mogu pomicati u svojem smjeru ili paralelno kamo god u prostoru, a njihovo hvatište može biti svaka točka u prostoru (npr. moment para sila). Vezani se vektori mogu pomicati samo u svojem smjeru, a njihovo hvatište može biti samo neka točka na pravcu u kojem djeluju (npr. sila, kutna brzina). Više sila koje djeluju u istoj točki su slobodni vektori, ali ako djeluju u različitim točkama, to su vezani vektori.

Apsolutna vrijednost ili modul vektora $|\boldsymbol{a}| = a$ je duljina orijentirane dužine kojom grafički prikazujemo vektor.

Vektor kojemu je modul jednak 1 zovemo jediničnim vektorom. Jedinične vektore u pozitivnim smjerovima koordinatnih osi x, y i z označujemo sa $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}$, i $\boldsymbol{k}$.

Ako je vektor zadan svojim komponentama (koordinatama)

$$\boldsymbol{a} = (a_x, a_y, a_z) = a_x\,\boldsymbol{i} + a_y\,\boldsymbol{j} + a_z\,\boldsymbol{k}$$

onda vrijedi:
$$|\boldsymbol{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}.$$

Vektor kojemu je modul jednak nuli zovemo nulvektorom. Oznaka za nulvektor je $\boldsymbol{o}$.

Vektori $\boldsymbol{a} = (a_x, a_y, a_z)$ i $\boldsymbol{b} = (b_x, b_y, b_z)$ su jednaki, ako su im jednake sve koordinate: $\quad a_x = b_x \quad a_y = b_y \quad a_z = b_z$.

Radijvektor $\boldsymbol{r}$ točke $\mathrm{P}(x, y, z)$ je vektor kojemu je početak u ishodištu 0 a kraj u točki P

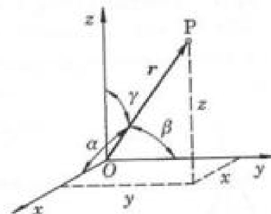
$$r = \boldsymbol{OP}.$$

Njegove koordinate su i koordinate točke $\mathrm{P}(x, y, z)$

$$\boldsymbol{r} = (x, y, z) = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k}$$
$$|\boldsymbol{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Ako vektor $\boldsymbol{r}$ zatvara s osima koordinata kutove α, β i γ, bit će kosinusi smjera vektora $\boldsymbol{r}$

$$\cos\alpha = \frac{x}{r} \quad \cos\beta = \frac{y}{r} \quad \cos\gamma = \frac{z}{r}.$$



[1] U ovom su priručniku vektori označeni debljim tiskom ($\boldsymbol{a}$).

Ako je početak vektora $\boldsymbol{a}$ u točki $A(x_1, y_1, z_1)$, a kraj u točki $B(x_2, y_2, z_2)$ onda su njegove koordinate $a_x = x_2 - x_1$, $a_y = y_2 - y_1$, $a_z = z_2 - z_1$, tj.

$$\boldsymbol{a} = (x_2 - x_1)\,\boldsymbol{i} + (x_2 - y_1)\,\boldsymbol{j} + (z_2 - z_1)\,\boldsymbol{k}.$$

Zbrajanje i oduzimanje vektora

Vektore zbrajamo i oduzimamo po zakonu paralelograma.



Zbroj vektora $\boldsymbol{s} = \boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}$

Koordinate zbroja $\boldsymbol{s} = (s_x, s_y, s_z)$ su:

$$s_x = a_x + b_x$$
$$s_y = a_y + b_y$$
$$s_z = a_z + b_z\,.$$



Razlika vektora $\boldsymbol{d} = \boldsymbol{a} - \boldsymbol{b}$

Koordinate razlike $\boldsymbol{d} = (d_x, d_y, d_z)$ su:

$$d_x = a_x - b_x$$
$$d_y = a_y - b_y$$
$$d_z = a_z - b_z$$

$$\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b} = \boldsymbol{b} + \boldsymbol{a} \qquad (\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}) + \boldsymbol{c} = \boldsymbol{a} + (\boldsymbol{b} + \boldsymbol{c}) \qquad \boldsymbol{a} - \boldsymbol{a} = \boldsymbol{0}$$
$$\boldsymbol{0} = (0, 0, 0).$$

Množenje vektora

a) *Množenje vektora skalarom* m, koji je proizvoljan realan broj

$$m\,\boldsymbol{a} = (ma_x, ma_y, ma_z).$$

Vektor $m\,\boldsymbol{a}$ leži na istom pravcu kao i vektor $\boldsymbol{a}$, a njegova je apsolutna vrijednost

$$|m\,\boldsymbol{a}| = |m|\;|\boldsymbol{a}|.$$

Za $m > 0$ vektori $\boldsymbol{a}$ i $m\,\boldsymbol{a}$ su istog smisla.

Za $m < 0$ vektori $\boldsymbol{a}$ i $m\,\boldsymbol{a}$ su suprotnog smisla.

b) *Skalarni produkt dvaju vektora* $\boldsymbol{a}$ i $\boldsymbol{b}$ je skalar

$$\boldsymbol{ab} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = |\boldsymbol{a}|\;|\boldsymbol{b}|\;\cos\alpha$$

α je kut među vektorima $\boldsymbol{a}$ i $\boldsymbol{b}$; dobivamo ga iz

$$\cos\alpha = \boldsymbol{ab}/(|\boldsymbol{a}|\cdot|\boldsymbol{b}|)$$



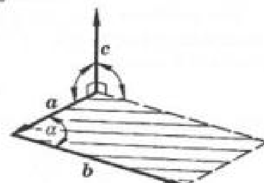
$\boldsymbol{ab} = \boldsymbol{ba} \qquad (\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b})\boldsymbol{c} = \boldsymbol{ac} + \boldsymbol{bc}$

$\alpha = 0\!: \qquad \boldsymbol{ab} = |\boldsymbol{a}|\;|\boldsymbol{b}|$

$\alpha = \pi/2\!: \qquad \boldsymbol{ab} = 0.$

c) *Vektorski produkt dvaju vektora* $\boldsymbol{a}$ i $\boldsymbol{b}$ je vektor

$$\boldsymbol{c} = \boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}$$



koji stoji okomito na ravninu vektora $\boldsymbol{a}$ i $\boldsymbol{b}$. Njegova apsolutna vrijednost jednaka je površini paralelograma, razapetog vektorima $\boldsymbol{a}$ i $\boldsymbol{b}$. Vektor $\boldsymbol{c}$ ima smisao određen po pravilu desnog vijka.

Koordinate vektorskog produkta $\boldsymbol{c} = (c_x, c_y, c_z)$ su:

$$c_x = a_y b_z - a_z b_y \qquad c_y = a_z b_x - a_x b_z \qquad c_z = a_x b_y - a_y b_x\,.$$

Koordinate vektorskog produkta dobijemo iz

$$\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$$

$$\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} = -\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{a} \qquad (\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}) \times \boldsymbol{c} = \boldsymbol{a} \times \boldsymbol{c} + \boldsymbol{b} \times \boldsymbol{c}\,.$$

Za $\alpha = 0, \pi$ je $\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} = 0.$

Površina trokuta razapetog vektorima $\boldsymbol{a}$ i $\boldsymbol{b}$ je $A = \frac{1}{2}\,|\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}|$, a paralelograma $A = |\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}|$.

d) *Mješoviti produkt vektora* $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ i $\boldsymbol{c}$ je skalar

$$(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c}) = \boldsymbol{a}\,(\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{c}) = (\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b})\,\boldsymbol{c} = \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{vmatrix}.$$

Apsolutna vrijednost mješovitog produkta jednaka je obujmu V paralelepipeda, konstruiranoga (razapetog) nad vektorima $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ i $\boldsymbol{c}$ u prostoru

$$V = |(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c})|.$$

Vektorsko-vektorski produkt

$$(\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}) \times \boldsymbol{c} = (\boldsymbol{ac})\boldsymbol{b} - (\boldsymbol{bc})\boldsymbol{a}$$

$$[(\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}) \times \boldsymbol{c}] \cdot \boldsymbol{d} = (\boldsymbol{ac})(\boldsymbol{bd}) - (\boldsymbol{bc})(\boldsymbol{ad}).$$

Primjeri:

Tri točke A, B i C leže na istom pravcu ako je vektorski produkt $\boldsymbol{AB} \times \boldsymbol{AC} = 0$.

Četiri točke A, B, C, i D leže u istoj ravnini ako je mješoviti produkt $(\boldsymbol{AB}, \boldsymbol{AC}, \boldsymbol{AD}) = 0$.

Vrijedi Lagrangeov identitet:

$$(\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}) \cdot (\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}) = (\boldsymbol{a}\,\boldsymbol{a})\,(\boldsymbol{b}\,\boldsymbol{b}) - (\boldsymbol{a}\,\boldsymbol{b})^2.$$

e) *Rastavljanje vektora* u ravnini i prostoru

Ako vektori $\boldsymbol{a} = (a_x, a_y, a_z)$ i $\boldsymbol{b} = (b_x, b_y, b_z)$ nisu paralelni ($\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} \neq \boldsymbol{0}$), tada se svaki treći vektor $\boldsymbol{c} = (c_x, c_y, c_z)$, koji leži u njihovoj ravnini može predočiti u obliku

$$\boldsymbol{c} = m\,\boldsymbol{a} + n\,\boldsymbol{b}$$

gdje su m i n skalari, određeni jednadžbama:

$$m = \frac{c_x b_y - c_y b_x}{a_x b_y - a_y b_x} \qquad n = \frac{a_x c_y - a_y c_x}{a_x b_y - a_y b_x}.$$

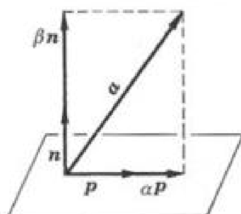
Ako vektori $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ i $\boldsymbol{c}$ nisu u istoj ravnini (mješoviti produkt $(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c}) \neq 0$), tada svaki četvrti vektor $\boldsymbol{d}$ u prostoru rastavljamo u obliku

$$\boldsymbol{d} = m\,\boldsymbol{a} + n\,\boldsymbol{b} + p\,\boldsymbol{c}$$

gdje su skalari m, n i p određeni jednadžbama:

$$m = \frac{(\boldsymbol{d}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c})}{(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c})} \qquad n = \frac{(\boldsymbol{d}, \boldsymbol{c}, \boldsymbol{a})}{(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c})} \qquad p = \frac{(\boldsymbol{d}, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b})}{(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c})}.$$

Zadana je ravnina i neka je $\boldsymbol{n}$ jedinični vektor normale te ravnine. Vektor $\boldsymbol{a}$ rastavimo na komponente u smjeru vektora $\boldsymbol{n}$ i jediničnog vektora ortogonalne projekcije vektora na ravninu:



$$\boldsymbol{a} = \alpha\,\boldsymbol{p} + \beta\,\boldsymbol{n}, \qquad \alpha, \beta \in \mathbf{R}$$

$$\boldsymbol{p} = \frac{(\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{a}) \times \boldsymbol{n}}{|(\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{a}) \times \boldsymbol{n}|} \qquad |\boldsymbol{p}| = 1$$

$$\alpha = \boldsymbol{p}\,\boldsymbol{a} = |\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{n}|, \qquad \beta = \boldsymbol{n}\,\boldsymbol{a}.$$

Piramida s vrhovima A, B, C, D ima obujam

$$V = \frac{1}{6}(\boldsymbol{AB}, \boldsymbol{AC}, \boldsymbol{AD})$$

i njena visina v spuštena iz vrha D na osnovku ABC je

$$v = \frac{6V}{|\boldsymbol{AB} \times \boldsymbol{AC}|} = \frac{|(\boldsymbol{AB}, \boldsymbol{AC}, \boldsymbol{AD})|}{|\boldsymbol{AB} \times \boldsymbol{AC}|}.$$

Primjer: $A(2, -1, -2)$, $B(2, 3, 1)$, $C(2, 0, -2)$, $D(1, 2, 1)$:

$$\boldsymbol{AB} = (0, 4, 3), \quad \boldsymbol{AC} = (0, 1, 0), \quad \boldsymbol{AD} = (-1, 3, 3).$$

Mješoviti produkt $(\boldsymbol{AB}, \boldsymbol{AC}, \boldsymbol{AD}) = 3$ i $V = 1/2$

$$\boldsymbol{AB} \times \boldsymbol{AC} = (-3, 0, 0), \ |\boldsymbol{AB} \times \boldsymbol{AC}| = 3 \ \text{ i } \ v = 1.$$

f) *Ravnina i pravac u prostoru*

Jednadžba ravnine koja prolazi točkom $T_0\,(x_0, y_0, z_0)$ i kojoj je $\boldsymbol{n} = (a, b, c)$ vektor normale:

$$(\boldsymbol{R} - \boldsymbol{r}_0)\,\boldsymbol{n} = 0$$

$\boldsymbol{R}$ je radijvektor bilo koje točke T (x, y, z) ravnine, a $\boldsymbol{r}_0$ radijvektor točke T_0.

Jednadžba ravnine:

opći oblik $\qquad ax + by + cz + m = 0, \qquad a^2 + b^2 + c^2 \neq 0$

normalni oblik $\qquad \dfrac{ax + by + cz + m}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} = 0.$

Jednadžba ravnine kroz tri točke $A(x_1, y_1, z_1)$, $B(x_2, y_2, z_2)$, i $C(x_3, y_3, z_3)$

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0.$$

Udaljenost d točke $T_1\,(x_1, y_1, z_1)$ od ravnine $ax + by + cz + m = 0$ jest

$$d = \left| \frac{ax_1 + by_1 + cz_1 + m}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right|.$$

Jednadžba pravca u prostoru koji prolazi točkom $T_0\,(x_0, y_0, z_0)$ i ima smjer vektora $\boldsymbol{p} = (p_1, p_2, p_3)$:

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{r}_0 + \mathrm{t}\,\boldsymbol{p} \qquad \mathrm{t} \text{ parametar}, \qquad -\infty < \mathrm{t} < \infty$$

$\boldsymbol{R} = (x, y, z)$ je radijvektor bilo koje točke $T(x, y, z)$ pravca, a $\boldsymbol{r}_0$ radijvektor točke T_0.

Parametarski oblik jednadžbe pravca:

$$x = x_0 + \mathrm{t}\,p_1$$
$$y = y_0 + \mathrm{t}\,p_2$$
$$z = z_0 + \mathrm{t}\,p_3.$$

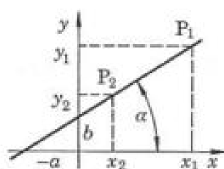
Udaljenost d točke $T_1(x_1, y_1, z_1)$ od pravca koji prolazi točkom $T_0(x_0, y_0, z_0)$ i kojemu je $\boldsymbol{e}$ jedinični vektor smjera jednaka je

$$d = |(\boldsymbol{r}_1 - \boldsymbol{r}_0) \times \boldsymbol{e}|$$

$$\boldsymbol{r}_0 = (x_0, y_0, z_0) \qquad \boldsymbol{r}_1 = (x_1, y_1, z_1).$$

ANALITIČKA GEOMETRIJA
u ravnini

Pravac



Opći oblik:

$$Ax + By + C = 0, \qquad A^2 + B^2 \neq 0.$$

Eksplicitni oblik:

$$y = mx + b \qquad m = \tan\alpha$$

b – odsječak na osi y

Segmentni oblik:

$$x/a + y/b = 1.$$

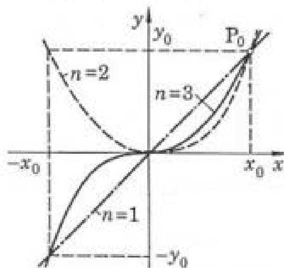
Jednadžba pravca kroz zadanu točku $P_1\,(x_1, y_1)$ uz zadani prikloni kut (koeficijent smjera $m = \tan\alpha$)

$$y - y_1 = m(x - x_1).$$

Jednadžba pravca kroz dvije zadane točke $P_1\,(x_1, y_1)$ i $P_2\,(x_2, y_2)$

$$(y - y_1)\,(x_1 - x_2) = (x - x_1)\,(y_1 - y_2).$$

Krivulje potencija



Parabole kroz točku $P_0\,(x_0, y_0)$

$$y = y_0\left(\frac{x}{x_0}\right)^n$$

$n = 1$
$y = y_0(x/x_0)$ (pravac)
$n = 2$
$y = y_0(x/x_0)^2$ (kvadratna parabola)
$n = 3$
$y = y_0(x/x_0)^3$ (kubna parabola).

Hiperbole kroz točku $P_0\,(x_0, y_0)$

$$yx^m = y_0\,x_0^m = \text{const.}$$

Konstrukcija krivulje

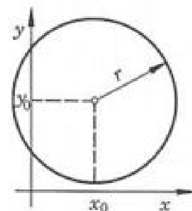
$$1 + \tan\beta = (1 + \tan\beta)^m.$$

Npr. za $\tan\alpha = 0{,}25$ je

m	1,1	1,2	1,3	1,4
$\tan\beta$	0,278	0,307	0,336	0,367

Čunosječnice

Kružnica



Opća jednadžba – za središte u točki (x_0, y_0)

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2.$$

Središnja jednadžba – za središte u ishodištu $(x_0 = 0, y_0 = 0)$

$$x^2 + y^2 = r^2.$$

Tjemena jednadžba – s ordinatnom osi kao tangentom $(x_0 = r, y_0 = 0)$

$$y^2 = 2rx - x^2.$$

Elipsa a, b poluosi (u smjerovima x, y)

Središnja jednadžba

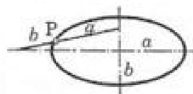
$$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1.$$

Tjemena jednadžba

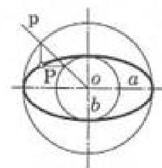
$$y^2 = (b^2/a^2)\,x\,(2a - x).$$

Konstrukcija elipse:

a) Ako dužinu, čiju duljinu $a + b$ točka P dijeli na dijelove duljina a i b, pomičemo tako, da njezine krajnje točke kližu po međusobno okomitim pravcima, opisuje točka P elipsu.



b) Ako dvije koncentrične kružnice polumjera a i b presječemo polupravcem p kojemu je početak u zajedničkom središtu o tih kružnica, i sjecištima povučemo paralele s dva okomita promjera, onda se te paralele sijeku u točki P elipse.



Parabola

Tjemena jednadžba – s ordinatnom osi kao tangentom i s koordinatama žarišta F $(p/2, 0)$

$$y^2 = 2px \qquad 2p \text{ parametar.}$$

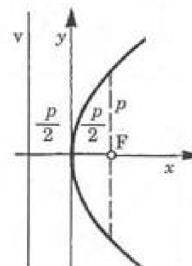
Ako os parabole ima smjer ordinatne osi y, onda se njena jednadžba dobije tako da u prethodnoj jednadžbi zamijenimo x i y.

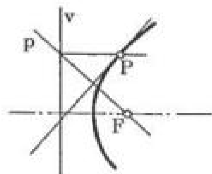
Jednadžba parabole kojoj tjeme ima koordinate (x_0, y_0)

$$(y - y_0)^2 = 2p(x - x_0).$$

Opći oblik jednadžbe parabole kojoj je os paralelna s osi y

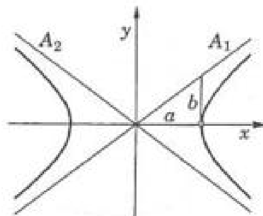
$$y = ax^2 + bx + c, \qquad a \neq 0.$$





Konstrukcija parabole:

Žarištem parabole povucimo pravac p i neka on siječe vodilicu (direktrisu) v u nekoj točki S. Tom točkom povucimo paralelu s osi. Simetrala dužine $\overline{SF}$ siječe tada tu paralelu u točki P parabole.



Hiperbola (A – asimptote)

Središnja jednadžba

$$x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1.$$

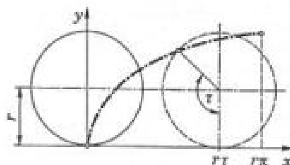
Tjemena jednadžba

$$y^2 = (b^2/a^2)\,x\,(x - 2a).$$

Kod jednakostrane hiperbole ($a = b$) su asimptote međusobno okomite i zatvaraju s koordinatnim osima kut 45°

$$x^2 - y^2 = a^2.$$

Cikloide



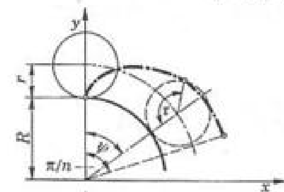
Cikloida nastaje pri kotrljanju kružnice po pravcu

$x = r(\hat{\tau} - \sin\tau)$

$y = r(1 - \cos\tau)$

τ = kut kotrljanja

$\hat{\tau}$(rad).



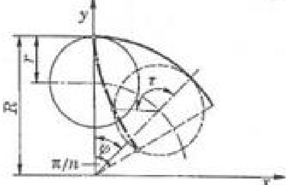
Epicikloida nastaje pri kotrljanju kružnice po vanjskoj strani druge kružnice

$x = r(m \sin\psi - \sin m\psi)$

$y = r(m \cos\psi - \cos m\psi)$

$m = (R + r)/r = n + 1$

$n = R/r \qquad \psi = \tau/n.$



Hipocikloida nastaje pri kotrljanju kružnice po nutarnjoj strani druge kružnice

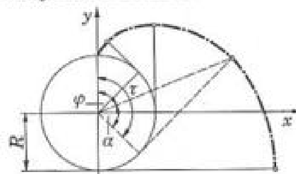
$x = r(m \sin\psi - \sin m\psi)$

$y = r(m \cos\psi + \cos m\psi)$

$m = (R - r)/r = n - 1$

$n = R/r \qquad \psi = \tau/n.$

Evolventa (involuta) nastaje pri odmatanju niti s kružnice



$x = R(\sin\tau - \hat{\tau}\cos\tau)$

$y = R(\cos\hat{\tau} + \hat{\tau}\sin\tau)$

$r = R/\cos\alpha$

$\hat{\tau} = \tan\alpha$

$\varphi = \tan\alpha - \hat{\alpha} = \operatorname{inv}\alpha$

$\hat{\tau}, \hat{\alpha}$(rad).

Evolventna funkcija inv α = tan $\alpha - \hat{\alpha}$

$\alpha°$	0′	10′	20′	30′	40′	50′
15	0,006 150	0,006 361	0,006 577	0,006 798	0,007 025	0,007 256
16	0,007 493	0,007 735	0,007 982	0,008 234	0,008 492	0,008 756
17	0,009 025	0,009 299	0,009 580	0,009 866	0,010 158	0,010 456
18	0,010 760	0,011 071	0,011 387	0,011 709	0,012 038	0,012 373
19	0,012 715	0,013 063	0,013 418	0,013 779	0,014 148	0,014 523
20	0,014 904	0,015 293	0,015 689	0,016 092	0,016 502	0,016 920
21	0,017 345	0,017 777	0,018 217	0,018 665	0,019 120	0,019 583
22	0,020 054	0,020 533	0,021 019	0,021 514	0,022 018	0,022 529
23	0,023 049	0,023 577	0,024 114	0,024 660	0,025 214	0,025 777
24	0,026 350	0,026 931	0,027 521	0,028 121	0,028 729	0,029 348
25	0,029 975	0,030 613	0,031 260	0,031 917	0,032 583	0,033 260
26	0,033 947	0,034 644	0,035 352	0,036 069	0,036 798	0,037 537
27	0,038 287	0,039 047	0,039 819	0,040 602	0,041 395	0,042 201
28	0,043 017	0,043 845	0,044 685	0,045 537	0,046 400	0,047 276
29	0,048 164	0,049 064	0,049 976	0,050 901	0,051 838	0,052 788
30	0,053 751	0,054 728	0,055 717	0,056 720	0,057 736	0,058 765

FUNKCIJE

Ako je svakoj vrijednosti x za $a \le x \le b$ pridružen točno određen realni broj y, kaže se, da je u intervalu $[a, b]$ dana funkcija f, koja se piše

$$y = f(x)$$

x argument ili neovisna varijabla

$f(x)$ funkcijska vrijednost

$[a, b]$ područje definicije funkcije.

Graf funkcije (krivulja (x)) je skup svih točaka $(x, f(x))$ u ravnini x, y.

Elementarne funkcije

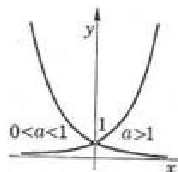
Polinom ili cijela racionalna funkcija n-tog stupnja je

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0, \qquad a_n \ne 0.$$

Razlomljena racionalna funkcija je kvocijent dvaju polinoma

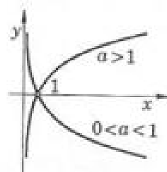
$$f(x) = \frac{b_m x^m + b_{m-1} x^{m-1} + \cdots + b_1 x + b_0}{a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0}.$$

Eksponencijalna i logaritamska funkcija



Eksponencijalna funkcija

$y = a^x \qquad a > 0,\ a \neq 1$

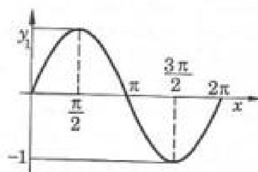


Logaritamska funkcija

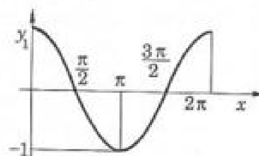
$y = \log_a x \qquad a > 0,\ a \neq 1$

Logaritamske su funkcije inverzne eksponencijalnim funkcijama.

Trigonometrijske funkcije



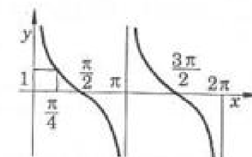
Sinus $\quad y = \sin x$



Kosinus $\quad y = \cos x$

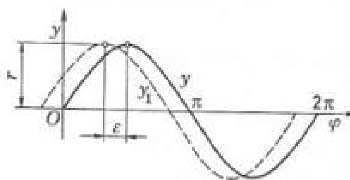


Tangens $\quad y = \tan x$



Kotangens $\quad y = \cot x$

Pomaknuta sinusoida



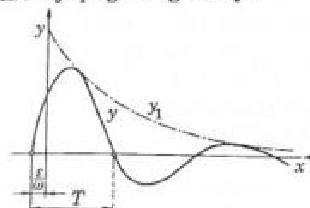
$y = r \sin \varphi$

r amplituda

Za fazni kut pomaknuta sinusoida

$y_1 = r \sin(\varphi + \varepsilon)$.

Krivulja prigušenog titranja



$$y = ce^{-\alpha x} \sin(\omega x + \varepsilon)$$
$$y_1 = ce^{-\alpha x}$$
$$T = 2\pi/\omega$$

Logaritamski dekrement

$$\Lambda = \ln \frac{y_i}{y_{i+1}}\ \alpha \frac{\pi}{\omega}$$

y_i i y_{i+1} su ordinate dvaju susjednih ekstrema.

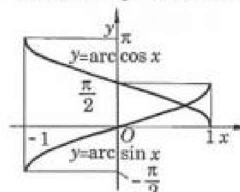
Ciklometričke funkcije

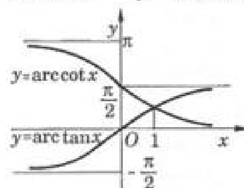
Arkus sinus $\quad y = \text{arc} \sin x$

Arkus kosinus $\quad y = \text{arc} \cos x$

Arkus tangens $\quad y = \text{arc} \tan x$

Arkus kotangens $\quad y = \text{arc} \cot x$





Ciklometričke su funkcije inverzne trigonometrijskim funkcijama. Među njima postoje sljedeće veze:

$\text{arc} \sin(-x) = -\text{arc} \sin x$

$\text{arc} \cos(-x) = \pi - \text{arc} \cos x$

$\text{arc} \sin x + \text{arc} \cos x = \pi/2$

$\text{arc} \tan(-x) = -\text{arc} \tan x$

$\text{arc} \cot(-x) = \pi - \text{arc} \cot x$

$\text{arc} \tan x + \text{arc} \cot x = \pi/2$.

Hiperbolne funkcije

Sinus hiperbolni

$$y = \text{sh}\, x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

Tangens hiperbolni

$$y = \text{th}\, x = \frac{\text{sh}\, x}{\text{ch}\, x} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

Kosinus hiperbolni

$$y = \text{ch}\, x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

Kotangens hiperbolni

$$y = \text{cth}\, x = \frac{\text{ch}\, x}{\text{sh}\, x} = \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}}.$$

Osnovne veze među hiperbolnim funkcijama:

$\text{ch}^2 x - \text{sh}^2 x = 1$

$1 - \text{th}^2 x = 1/(\text{ch}^2 x)$

$\text{cth}^2 x - 1 = 1/(\text{sh}^2 x)$

$\text{sh}\, 2x = 2\, \text{sh}\, x\, \text{ch}\, x$

$\text{ch}\, 2x = \text{ch}^2 x + \text{sh}^2 x$

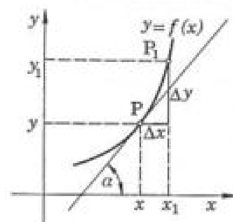
$\text{sh}(x \pm y) = \text{sh}\, x\, \text{ch}\, y \pm \text{ch}\, x\, \text{sh}\, y$

$\text{ch}(x \pm y) = \text{ch}\, x\, \text{ch}\, y \pm \text{sh}\, x\, \text{sh}\, y$

$\text{sh}^2 x = (\text{ch}\, 2x - 1)/2$

$\text{ch}^2 x = (\text{ch}\, 2x + 1)/2$.

DERIVACIJA FUNKCIJE



Derivacija funkcije $y = f(x)$ u točki x

$$y' = f'(x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}.$$

Osnovna pravila deriviranja

$[u(x) \pm v(x)]' = u'(x) \pm v'(x)$

$[c \cdot u(x)]' = c \cdot u'(x), \qquad c = \text{const}$

$[u(x) \cdot v(x)]' = u'(x)v(x) + u(x)v'(x)$

$[u(x)/v(x)]' = [u'(x)v(x) - u(x)v'(x)]/[v(x)]^2$

$\{u[v(x)]\}' = u'(v) \cdot v'(x)$

Derivacije elementarnih funkcija

$y = c$	$y' = 0$	
$y = x^n$	$y' = n\,x^{n-1}$	n – realni broj
$y = \sqrt{x}$	$y' = 1/(2\sqrt{x})$	
$y = a^x$	$y' = a^x \ln a$	
$y = e^x$	$y' = e^x$	
$y = \log_a x$	$y' = 1/(x \ln a)$	
$y = \lg x$	$y' = 1/(2{,}302\,6\,x)$	
$y = \ln x$	$y' = 1/x$	
$y = \sin x$	$y' = \cos x$	
$y = \cos x$	$y' = -\sin x$	
$y = \tan x$	$y' = 1/\cos^2 x = 1 + \tan^2 x$	
$y = \cot x$	$y' = -1/\sin^2 x = -(1 + \cot^2 x)$	
$y = \arcsin x$	$y' = 1/\sqrt{1 - x^2}$	
$y = \arccos x$	$y' = -1/\sqrt{1 - x^2}$	
$y = \arctan x$	$y' = 1/(1 + x^2)$	
$y = \operatorname{arc\,cot} x$	$y' = -1/(1 + x^2)$.	

Diferencijal funkcije $y = f(x)$ u točki x je $dy = f'(x)\,dx = df$

Osnovna pravila pri računanju diferencijala

$d[u(x) \pm v(x)] = du \pm dv \qquad d[u(x) \cdot v(x)] = u(x)dv + v(x)du$

$d[c \cdot u(x)] = c \cdot du \qquad d[u(x)/v(x)] = [v(x)du - u(x)dv]/[v(x)]^2$.

Derivacije višeg reda

Ako je $f'(x)$ derivacija funkcije $y = f(x)$, tada je derivacija drugoga reda (druga derivacija)

$$f''(x) = [f'(x)]' = y'' = d^2y/dx^2.$$

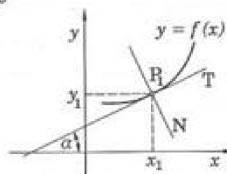
Derivacija n-tog reda funkcije (x)

$$f^{(n)}(x) = [f^{(n-1)}(x)]' = y^{(n)} = d^ny/dx^n.$$

Derivacija parametarski zadane funkcije

Za funkciju $x = x(t), y = y(t)$, gdje je t parametar, bit će $y'(x) = \dot{y}(t)/\dot{x}(t)$ i $y''(x) = [\dot{x}(t)\,\ddot{y}(t) - \ddot{x}(t)\,\dot{y}(t)]/[\dot{x}(t)]^3$, pri čem je točkom označena derivacija funkcije s obzirom na parametar t.

Geometrijsko značenje derivacije funkcije



Derivacija funkcije $f'(x)$ jednaka je koeficijentu smjera tangente na krivulju $y = f(x)$ u točki x

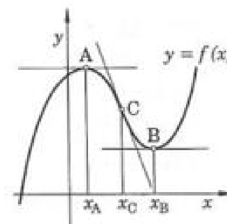
$$f'(x) = \tan \alpha.$$

Tangenta na krivulju $y = f(x)$ u točki $P_1(x_1, y_1)$

$$y - y_1 = f'(x_1)(x - x_1).$$

Normala na krivulju $y = f(x)$ u točki $P_1(x_1, y_1)$

$$y - y_1 = [-1/f'(x_1)](x - x_1).$$



Ekstremne vrijednosti funkcije $y = f(x)$ bit će u točki, gdje je $f'(x) = 0$:

maksimum (A): $f'(x_A) = 0 \qquad f''(x_A) < 0$

minimum (B): $f'(x_B) = 0 \qquad f''(x_B) > 0$

Infleksija funkcije $f(x)$ bit će u točki (C), gdje je:

$$f''(x_C) = 0 \quad \text{i} \quad f'''(x_C) \neq 0.$$

Za krivulju $y = f(x)$ su:

polumjer kružnice zakrivljenosti

$$r = \sqrt{(1 + y'^2)^3}/|y''|$$

koordinate središta kružnice zakrivljenosti

$$p = x - [y'(1 + y'^2)]/y'' \qquad q = y + (1 + y'^2)/y''.$$

Parcijalna derivacija

Parcijalnu derivaciju funkcije $z = f(x, y)$ – npr. po varijabli x – računamo tako, da funkciju deriviramo po nezavisnoj varijabli x, dok nezavisnu varijablu y pritom smatramo konstantom.

Parcijalna derivacija po x funkcije $z = f(x, y)$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x}.$$

Parcijalna derivacija po y funkcije $z = f(x, y)$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \lim_{\Delta y \to 0} \frac{f(x, y + \Delta y) - f(x, y)}{\Delta y}.$$

Totalni diferencijal funkcije z

$$dz = \frac{\partial z}{\partial x} dx + \frac{\partial z}{\partial y} dy.$$

Derivacije implicitne funkcije $y(x)$, zadane jednadžbom $\varphi(x, y) = 0$

$$y'(x) = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big/ \frac{\partial \varphi}{\partial y}.$$

INTEGRAL

Neodređeni integral

$\int f(x)\,\mathrm{d}x = I(x) + C$, gdje je $I'(x) = f(x)$, $C = \text{const.}$

Osnovna pravila za izračunavanje neodređenog integrala

$\int [u(x) \pm v(x)]\mathrm{d}x = \int u'(x)\mathrm{d}x \pm \int v(x)\mathrm{d}x$

$\int [C \cdot u(x)]\mathrm{d}x = C \int u(x)\mathrm{d}x.$

Parcijalna integracija

$\int u(x)\mathrm{d}v = u(x)\, v(x) - \int v(x)\mathrm{d}u.$

Neki osnovni integrali

$\int a\mathrm{d}x = ax + C$

$\int x^n\mathrm{d}x = (x^{n+1})/(n+1) + C, \qquad n \neq -1$

$\int (1/x)\mathrm{d}x = \ln x + C$

$\int a^x\mathrm{d}x = a^x/\ln a + C$

$\int e^x\mathrm{d}x = e^x + C$

$\int \ln x\,\mathrm{d}x = x(\ln x - 1) + C \qquad \int (1/\sin^2 x)\mathrm{d}x = -\cot x + C$

$\int \sin x\,\mathrm{d}x = -\cos x + C \qquad \int (1/\cos^2 x)\mathrm{d}x = \tan x + C$

$\int \cos x\,\mathrm{d}x = \sin x + C \qquad \int (1/\sqrt{1-x^2})\mathrm{d}x = \arcsin x + C$

$\int \tan x\,\mathrm{d}x = -\ln \cos x + C \qquad \int [1/(1+x^2)]\mathrm{d}x = \arctan x + C$

$\int \cot x\,\mathrm{d}x = \ln \sin x + C \qquad \int (1/\sqrt{x^2-a})\mathrm{d}x = \ln(x + \sqrt{x^2-a}) + C.$

Uvođenje nove varijable

$x = x(t) \qquad \mathrm{d}x = \dot{x}(t)\mathrm{d}t$

$$\int f(x)\mathrm{d}x = \int f[x(t)]\,\dot{x}(t)\,\mathrm{d}t.$$

Primjeri:

1. $\int (a+bx)^n\,\mathrm{d}x = \int t^n(1/b)\mathrm{d}t = (1/b)\,(a+bx)^{n+1}/(n+1) + C, \qquad n \neq 1$
   $a + bx = t, \quad \mathrm{d}x = (1/b)\,\mathrm{d}t.$
2. $\int e^{nx}\mathrm{d}x = (1/n)e^{nx} + C, \qquad \int \sin nx\,\mathrm{d}x = -(1/n)\cos nx + C$
   $nx = t, \qquad \mathrm{d}x = (1/n)\,\mathrm{d}t.$
3. $\int 1/(x^2+4)\,\mathrm{d}x = (1/4)\int 1/[(x/2)^2+1]\,\mathrm{d}x = (1/2)\arctan(x/2) + C$
   $x/2 = t.$

Određeni integral

$$\int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x = [I(x)]_a^b = I(b) - I(a), \quad \text{gdje je} \quad I(x) = \int f(x)\,\mathrm{d}x.$$

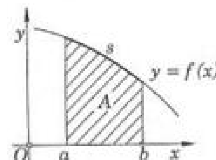
Uporaba određenog integrala

Određivanje duljine luka krivulje i površine lika

1. Krivulja je zadana jednadžbom $y = f(x)$,
   $a \leq x \leq b$.

   Duljina luka s krivulje

   $$s = \int_a^b \sqrt{1+y'^2}\,\mathrm{d}x, \qquad \mathrm{d}s = \sqrt{\mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2}.$$

   Površina A lika između luka krivulje i osi x

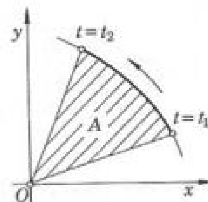
   $$A = \int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x.$$

2. Krivulja je zadana parametarski

   $$x = x(t), \quad y = y(t), \quad t_1 \leq t \leq t_2.$$

   Duljina luka s krivulje

   $$s = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}\,\mathrm{d}t.$$

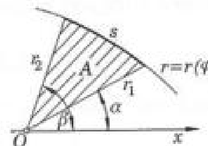
   Površina A lika

   $$A = \frac{1}{2}\int_{t_1}^{t_2} (x\dot{y} - \dot{x}y)\mathrm{d}t.$$

3. Krivulja je zadana polarnim koordinatama
   $r = r(\varphi), \quad \alpha \leq \varphi \leq \beta$

   Duljina luka s krivulje

   $$s = \int_\alpha^\beta \sqrt{r^2 + r'^2}\,\mathrm{d}\varphi.$$

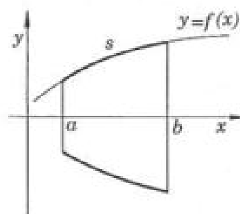
   

   Površina A isječka

   $$A = \frac{1}{2}\int_\alpha^\beta r^2(\varphi)\,\mathrm{d}\varphi.$$

Izračunavanje površine i obujma rotacijskih tijela

Rotacijsko tijelo nastaje rotacijom krivulje $y = f(x)$ oko osi x, $a \le x \le b$.

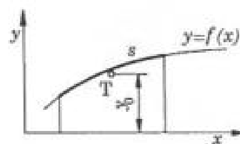


Površina plašta A rotacijskog tijela

$$A = 2\pi \int_a^b y\sqrt{1+y'^2}\, dx.$$

Obujam V rotacijskog tijela

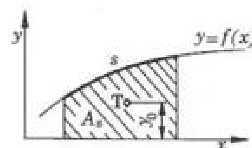
$$V = \pi \int_a^b y^2\, dx.$$



Guldinova pravila:

Površina plašta A rotacijskog tijela jednaka je umnošku duljine luka s krivulje i opsega kružnice što ga opisuje njeno težište T:

$$A = 2\pi\, y_0\, s.$$



Obujam V rotacijskog tijela jednak je umnošku površine A_s ispod krivulje i opsega kružnice što je opisuje težište T:

$$V = 2\pi\, y_0\, A_s.$$

Težišta krivulja, likova i tijela – v. str. 133 ... 134.

Numerička integracija

Često treba izračunati vrijednost određenog integrala gdje je funkcija $f(x)$ zadana u obliku tablice ili ne poznajemo njezin neodređeni integral.

Trapezna formula

Interval $[a, b]$ podijelimo na n jednakih dijelova širine $h = (b - a)/n$. Krajevi k-tog podintegrala imaju apscise:

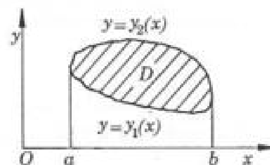
$$x_{k-1} = x_0 + (k-1)h, \qquad x_k = x_0 + kh,$$

pri čemu vrijedi: $x_0 = a, x_n = b, f(x_k) = y_k,$ pa je:

$$\int_a^b f(x)\, dx \approx h\left(\frac{1}{2}y_0 + y_1 + \cdots + y_{n-1} + \frac{1}{2}y_n\right).$$

Višestruki integrali

Dvostruki integral



Dvostruki integral funkcije $f(x, y)$ po području D računa se po formuli

$$\iint_D f(x,y)\, dx\, dy = \int_a^b dx \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} f(x,y)\, dy.$$

Transformacija dvostrukog integrala u polarne koordinate

$$x = r\cos\varphi \qquad y = r\sin\varphi$$

$$\iint_D f(x,y)\, dx\, dy = \iint_D f(r\cos\varphi, r\sin\varphi)\, r\, dr\, d\varphi.$$

Površina područja D

$$A = \iint_D dx\, dy.$$

Obujam tijela što ga nad područjem D omeđuju plohe, dane jednadžbama:

$$z = z_1(x,y) \quad \text{i} \quad z = z_2(x,y)$$

gdje je:

$$z_2(x,y) \ge z_1(x,y) \qquad (x,y) \in D$$

$$V = \iint_D [z_2(x,y) - z_1(x,y)]\, dx\, dy.$$

Trostruki integral

Trostruki integral funkcije $f(x, y, z)$ po području V računa se po formuli

$$\iiint_V f(x,y,z)\, dx\, dy\, dz = \int_a^b dx \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} dy \int_{z_1(x,y)}^{z_2(x,y)} f(x,y,z)\, dz.$$

Transformacija trostrukog integrala u sferne (kugline) koordinate:

$$x = r\cos\varphi\cos\vartheta \qquad y = r\cos\varphi\sin\vartheta \qquad z = r\sin\varphi$$

$$\iiint_V f(x,y,z)\, dx\, dy\, dz = \iiint_{V_1} f(r\cos\varphi\cos\vartheta, r\cos\varphi\sin\vartheta, r\sin\varphi)\, r^2\cos\varphi\, dr\, d\varphi\, d\vartheta.$$

DIFERENCIJALNE JEDNADŽBE

Diferencijalna jednadžba s razdvojenim varijablama

$$f(x)\mathrm{d}x = g(y)\mathrm{d}y.$$

Opće rješenje

$$\int f(x)\mathrm{d}x = \int g(y)\mathrm{d}y + C, \qquad C = \text{const}.$$

Homogena diferencijalna jednadžba

$$y' = f\left(\frac{y}{x}\right).$$

Rješavamo je supstitucijom

$$y = ux, \qquad y' = u'x + u.$$

Opće rješenje

$$\int \frac{1}{x}\,\mathrm{d}x = \int \frac{1}{f(u) - u}\,\mathrm{d}u + C.$$

Linearna diferencijalna jednadžba 1. reda

$$y' + g(x)y + h(x) = 0.$$

Opće rješenje

$$y = -\mathrm{e}^{-G(x)}\int h(x)\mathrm{e}^{G(x)}\mathrm{d}x + C\mathrm{e}^{-G(x)},$$

gdje je:

$$G(x) = \int g(x)\mathrm{d}x.$$

Bernoullijeva diferencijalna jednadžba

$$y' + p(x)\,y = r(x)y^n, \qquad n \neq 0,1.$$

Jednadžbu dijelimo s y^n i supstitucijom

$$z = y^{-n+1}, \quad z' = (1-n)\,y^{-n}\,y'$$

transformiramo je u linearnu jednadžbu

$$z' + (1-n)\,p(x)\,z = (1-n)\,r(x).$$

Homogena linearna diferencijalna jednadžba 2. reda s konstantnim koeficijentima

$$y'' + a_1y' + a_2y = 0.$$

Rješenje nalazimo pomoću supstitucije

$$y = \mathrm{e}^{kx}, \qquad y' = k\mathrm{e}^{kx}, \qquad y'' = k^2\mathrm{e}^{kx}$$

dobiva se karakteristična jednadžba

$$k^2 + a_1k + a_2 = 0.$$

Opće rješenje diferencijalne jednadžbe ovisno je o korijenima k_1 i k_2 karakteristične jednadžbe:

k_1, k_2 različiti realni brojevi $\qquad y = C_1\mathrm{e}^{k_1x} + C_2\mathrm{e}^{k_2x}$

k_1, k_2 jednaki realni brojevi: $k_1 = k_2 = k \qquad y = (C_1 + C_2x)\mathrm{e}^{kx}$

k_1, k_2 konjugirano kompleksni brojevi: $k_{1,2} = a \pm ib$

$$y = \mathrm{e}^{ax}(C_1\cos bx + C_2\sin bx).$$

Nehomogena linearna diferencijalna jednadžba 2. reda s konstantnim koeficijentima

$$y'' + py' + qy = f(x),$$

gdje su p i q konstante.

Najprije riješimo pripadnu homogenu jednadžbu

$$y_h'' + py_h' + qy_h = 0.$$

Njeno opće rješenje je

$$y_h = C_1y_1(x) + C_2y_2(x),$$

gdje su y_1 i y_2 partikularna rješenja homogene jednadžbe, a njih nalazimo metodom varijacije konstanti:

$$\bar{y} = u_1(x)\,y_1(x) + u_2(x)\,y_2(x).$$

Funkcije $u_1(x)$ i $u_2(x)$ određujemo iz sustava jednadžbi

$$u_1'y_1 + u_2'y_2 = 0$$

$$u_1'y_1' + u_2'y_2' = f(x).$$

Primjer:

Za nehomogenu jednadžbu

$$y'' + y = 2\sin x$$

pripadna homogena jednadžba je

$$y_h'' + y_h = 0$$

koja ima opće rješenje

$$y_h = C_1\sin x + C_2\cos x$$

$$\bar{y} = u_1\sin x + u_2\cos x.$$

Funkcije u_1 i u_2 nalazimo iz sustava jednadžbi

$$u_1'\sin x + u_2'\cos x = 0$$

$$u_1'\cos x - u_2'\sin x = 2\sin x$$

i dobivamo

$$u_1' = \sin 2x$$

$$u_1 = -\frac{1}{2}\cos 2x$$

$$u_2' = -2\sin^2 x = \cos 2x - 1$$

$$u_2 = \frac{1}{2}\sin 2x - x.$$

Stoga je

$$\bar{y} = \frac{1}{2}\sin x - x\cos x,$$

pa je opće rješenje prvotno zadane nehomogene jednadžbe

$$y = C_1\sin x + C_2\cos x - x\cos x.$$

Derivacija i integracija vektorskih funkcija

Definicija derivacije vektorske funkcije $\boldsymbol{a}(t)$ realne varijable t je ista kao za skalarne funkcije.

Derivacija zbroja i razlike vektorskih funkcija

$$[m\,\boldsymbol{a}(t) \pm n\,\boldsymbol{b}(t)]' = m\,\boldsymbol{a}'(t) \pm n\,\boldsymbol{b}'(t).$$

Derivacija skalarnog produkta

$$[\boldsymbol{a}(t)\boldsymbol{b}(t)]' = \boldsymbol{a}'(t)\boldsymbol{b}(t) + \boldsymbol{a}(t)\boldsymbol{b}'(t).$$

Derivacija vektorskog produkta

$$[\boldsymbol{a}(t) \times \boldsymbol{b}(t)]' = \boldsymbol{a}'(t) \times \boldsymbol{b}(t) + \boldsymbol{a}(t) \times \boldsymbol{b}'(t).$$

Vektor $\boldsymbol{a}(t)$ s komponentama X, Y i Z (koje su skalarne funkcije)

$$\boldsymbol{a}(t) = [X(t), Y(t), Z(t)]$$

ima derivaciju

$$\boldsymbol{a}'(t) = [X'(t), Y'(t), Z'(t)].$$

Funkcija $\boldsymbol{a}(t, s)$ ima dvije parcijalne derivacije

$$\boldsymbol{a}_t = \left(\frac{\partial X}{\partial t}, \frac{\partial Y}{\partial t}, \frac{\partial Z}{\partial t}\right) \qquad \boldsymbol{a}_s = \left(\frac{\partial X}{\partial s}, \frac{\partial Y}{\partial s}, \frac{\partial Z}{\partial s}\right)$$

i totalni diferencijal

$$\mathrm{d}\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_t\,\mathrm{d}t + \boldsymbol{a}_s\,\mathrm{d}s.$$

Neodređeni integral vektorske funkcije

$$a(t) = (X(t), Y(t), Z(t))$$

dan je formulom

$$\int a(t)\,\mathrm{d}t = \left(\int X(t)\,\mathrm{d}t, \int Y(t)\,\mathrm{d}t, \int Z(t)\,\mathrm{d}t\right),$$

a određeni integral za $\alpha \le t \le \beta$ formulom

$$\int_\alpha^\beta a(t)\,\mathrm{d}t = \left(\int_\alpha^\beta X(t)\,\mathrm{d}t, \int_\alpha^\beta Y(t)\,\mathrm{d}t, \int_\alpha^\beta Z(t)\,\mathrm{d}t\right).$$

Krivulje u prostoru

Duljina luka s prostorne krivulje $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$ za $\alpha \le t \le \beta$ dana je sa

$$s = \int_\alpha^\beta \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}\,\mathrm{d}t,$$

gdje točkica znači derivaciju po parametru t.

Ako je krivulja dana jednadžbama $y = y(x)$, $z = z(x)$, bit će duljina luka za $a \le x \le b$

$$s = \int_a^b \sqrt{1 + y'^2 + z'^2}\,\mathrm{d}t.$$

Za krivulju danu u vektorskom obliku jednadžbom

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) = (x(t), y(t), z(t))$$

tangencijalni je vektor dan sa

$$\dot{\boldsymbol{r}} = (\dot{x}(t), \dot{y}(t), \dot{z}(t)).$$

Fleksija krivulje je

$$\varkappa = \frac{1}{\varrho} = \frac{|\dot{\boldsymbol{r}} \times \ddot{\boldsymbol{r}}|}{|\dot{\boldsymbol{r}}|^3},$$

a njena torzija

$$\tau = \frac{1}{\tau} = \frac{(\dot{\boldsymbol{r}}, \ddot{\boldsymbol{r}}, \dddot{\boldsymbol{r}})}{|\dot{\boldsymbol{r}} \times \ddot{\boldsymbol{r}}|^2}.$$

$\frac{1}{\tau}$ se naziva polumjer torzije krivulje.

Jedinični vektor tangente $\boldsymbol{t}$ je

$$\boldsymbol{t} = \dot{\boldsymbol{r}}/|\dot{\boldsymbol{r}}|.$$

Ako parametar t znači vrijeme onda je jednadžbom $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t)$ zadan trag tvarne točke koja se giba. Pri tome je

vektor brzine $\boldsymbol{v}(t) = \dot{\boldsymbol{r}}(t) = v\boldsymbol{t}$

vektor ubrzanja $\boldsymbol{a}(t) = \dot{\boldsymbol{v}}(t)$.

Za vektor $\boldsymbol{a}(t)$ vrijedi ovaj rastav na tangencijalnu i normalnu komponentu

$$\boldsymbol{a}(t) = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{t} + \frac{v^2}{\varrho}\boldsymbol{n},$$

gdje je $\boldsymbol{n}$ jedinični vektor glavne normale, ϱ polumjer kružnice zakrivljenosti.

Ploha P u prostoru neka je zadana eksplicitnom jednadžbom $z = z(x, y)$. Neka je D područje u ravnini x, y. Površina S dijela plohe koji se nalazi iznad područja D računa se po formuli

$$S = \iint_D \sqrt{1 + p^2 + q^2}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y \qquad p = \frac{\partial z}{\partial x}, \qquad q = \frac{\partial z}{\partial y}.$$

Ako je ploha zadana parametarski u vektorskom obliku sa

$$\boldsymbol{r}(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v)),$$

gdje su u i v parametri $(u, v) \in D$, onda vrijedi

$$S = \iint_D \sqrt{EG - F^2}\,\mathrm{d}u\,\mathrm{d}v,$$

gdje su $E = \boldsymbol{r}_u\boldsymbol{r}_u$, $F = \boldsymbol{r}_u\boldsymbol{r}_v$, $G = \boldsymbol{r}_v\boldsymbol{r}_v$ koeficijenti prve fundamentalne forme plohe.

Skalarna i vektorska polja

Skalarno polje $u = u(x, y, z)$.

Vektorsko polje $\boldsymbol{V} = (X(x, y, z), Y(x, y, z), Z(x, y, z))$.

Operator derivacije (nabla): $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$.

Gradijent skalarnog polja u je vektorsko polje

$$\text{grad } u = \left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}\right) = \nabla u .$$

Divergencija vektorskog polja $\boldsymbol{V}$ je skalarno polje, određeno jednadžbom

$$\text{div } \boldsymbol{V} = \nabla \boldsymbol{V} = \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z}.$$

Rotor vektorskog polja $\boldsymbol{V}$ je vektorsko polje, određeno jednadžbom

$$\text{rot V} = \nabla \times \boldsymbol{V} = \left(\frac{\partial Z}{\partial y} - \frac{\partial Y}{\partial z}, \frac{\partial X}{\partial z} - \frac{\partial Z}{\partial x}, \frac{\partial Y}{\partial x} - \frac{\partial X}{\partial y}\right).$$

Vektorsko je polje $\boldsymbol{V}$ potencijalno, ako je ono gradijent skalarnoga polja u

$$\boldsymbol{V} = \text{grad } u.$$

Vektorsko je polje $\boldsymbol{V}$ solenoidalno (bez izvora), ako je div $\boldsymbol{V} = 0$.

Vektorsko polje $\boldsymbol{V}$ nema vrtloga, ako je rot $\boldsymbol{V} = \boldsymbol{0}$. Bezvrtložno je vektorsko polje samo tada, ako je potencijalno.

Vektorsko polje $\boldsymbol{V}$ je harmonično (Laplaceovo), ako u njemu nema ni izvora, ni vrtloga. Tada postoji takvo skalarno polje u za koje

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \Delta u = 0,$$

gdje je: $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ Laplaceov operator.

Za skalarna polja u i v i vektorska polja $\boldsymbol{V}$ i $\boldsymbol{R}$ vrijedi

$$\begin{aligned}
\text{rot grad } u &= \nabla \times \nabla u = 0\\
\text{div rot } \boldsymbol{V} &= \nabla (\nabla x \boldsymbol{V}) = 0\\
\text{grad div } \boldsymbol{V} &= \nabla (\nabla \boldsymbol{V})\\
\text{div grad } u &= \nabla (\nabla u) = (\nabla\nabla) u = \Delta u\\
\text{rot rot } \boldsymbol{V} &= \nabla \times (\nabla \times \boldsymbol{V}) = \text{grad div } \boldsymbol{V} - \Delta \boldsymbol{V}\\
\Delta \boldsymbol{V} &= (\nabla X, \nabla Y, \nabla Z), \quad \boldsymbol{V} = (X, Y, Z)\\
\text{grad } (uv) &= u \text{ grad } v + v \text{ grad } u\\
\text{div } (u \boldsymbol{V}) &= u \text{ div } \boldsymbol{V} + \boldsymbol{V} \text{ grad } u\\
\text{rot } (u \boldsymbol{V}) &= u \text{ rot } \boldsymbol{V} + \text{grad } u \times \boldsymbol{V}\\
\Delta(uv) &= u \nabla v + v \nabla u + 2 \text{ grad } u \cdot \text{grad } v\\
\text{div } (\boldsymbol{V} \times \boldsymbol{R}) &= \boldsymbol{R} \text{ rot } \boldsymbol{V} - \boldsymbol{V} \text{ rot } \boldsymbol{R}.
\end{aligned}$$

Neka je $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) = (x(t), y(t), z(t))$ krivulja k u prostoru i T_1, T_2 točke od k kojima odgovaraju vrijednosti parametara t_1 i t_2. Neka je dalje $V = (X(x, y, z), Y(x, y, z), Z(x, y, z))$ vektorsko polje.

Krivuljni integral polja $\boldsymbol{V}$ duž krivulje k od točke T_1 do točke T_2 definiran je formulom

$$\int_{k\,T_1}^{T_2} \boldsymbol{V}\, d\boldsymbol{r} = \int_{t_1}^{t_2} (\boldsymbol{V}\, \dot{\boldsymbol{r}}) dt,$$

gdje je polje $\boldsymbol{V}$ uzeto u točkama krivulje k.

Ako je polje $\boldsymbol{V}$ potencijalno ($\boldsymbol{V}$ = grad u) onda vrijednost krivuljnog integrala ovisi samo o početnoj i konačnoj točki, a ne o samoj krivulji duž koje integriramo, tj.

$$\int_{k\,T_1}^{T_2} \boldsymbol{V}\, d\boldsymbol{r} = u\,(T_2) - u\,(T_1).$$

Potencijal u polja $\boldsymbol{V} = (X, Y, Z)$ jednak je

$$u = u\,(x, y, z) = \int_{x_1}^{x} X(x, y, z)\, dx + \int_{y_1}^{y} Y(x_1, y, z)\, dy + \int_{z_1}^{z} Z(x_1, y_1, z)\, dz ,$$

gdje je $T_1(x_1, y_1, z_1)$ bilo koja točka područja definicije polja $\boldsymbol{V}$.

Neka je ploha P orijentirana izborom jednog od dva moguća jedinična polja $\boldsymbol{N}$ plošnih normala:

za $z = z(x, y)$: $\boldsymbol{N} = \pm \frac{(-p, -q, 1)}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}$

za $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(u, v)$: $\boldsymbol{N} = \pm \frac{\boldsymbol{r}_u \times \boldsymbol{r}_v}{\sqrt{EG - F^2}}$.

Plošni integral polja $\boldsymbol{V} = (X(x, y, z), Y(x, y, z), Z(x, y, z))$ po dijelu P orijentirane plohe definiran je sa:

za $z = z(x, y)$: $\iint_P \boldsymbol{V}\, d\boldsymbol{P} = \iint_D (\boldsymbol{V}\boldsymbol{N})\, dP = \pm \iint_D (-pX - qY + Z)\, dx\, dy$

za $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(u, v)$: $\iint_P \boldsymbol{V}\, d\boldsymbol{P} = \iint_D (\boldsymbol{V}\boldsymbol{N})\, dP = \pm \iint_D (\boldsymbol{V}, \boldsymbol{r}_u, \boldsymbol{r}_v)\, du\, dv$.

Polje $\boldsymbol{V}$ računato je u točkama plohe i $d\boldsymbol{P} = \boldsymbol{N}\, dP$, u prvom slučaju D je ortogonalna projekcija dijela P na xy ravninu, a u drugom područje parametara (u, v) koje odgovara dijelu plohe P.

Laplaceov transformat $F(x)$ funkcije $f(t)$ (za realni broj t) definiran je sa

$$F(x) = \mathrm{L}\{f(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-tx} f(x)\, dt, \qquad x \in \mathbf{C}.$$

Svojstva transformacije:

$$\mathrm{L}\{a f(t) + b\, g(t)\} = a\, \mathrm{L}\{f(t)\} + b\, \mathrm{L}\{g(t)\}.$$

Za $\mathrm{L}\{f(t)\} = F(x)$ je:

$$\mathrm{L}\{f(at)\} = 1/a \cdot F(x/a) \qquad a > 0$$

$$\mathrm{L}\{e^{-at} f(t)\} = F(x + a)$$

$$\mathrm{L}\{f'(t)\} = xF(x) - f(0)$$

$$\mathrm{L}\{f^{(n)}(t)\} = x^n F(x) - x^{n-1} f(0) - x^{n-2} f'(0) - \cdots - x f^{(n-2)}(0) - f^{(n-1)}(0)$$

$$\mathrm{L}\{t^n f(t)\} = (-1)^n F^{(n)}(x).$$

Primjeri transformacije:

$f(t)$	$F(x)$	$f(t)$	$F(x)$
1	$1/x$	sh at	$a/(x^2 - a^2)$
t^n	$n!/x^{n+1}$	ch at	$x/(x^2 - a^2)$
e^{at}	$1/(x - a)$	$t\, e^{at}$	$1/(x - a)^2$
sin at	$a/(x^2 + a^2)$	t sin at	$2ax/(x^2 + a^2)^2$
cos at	$x/(x^2 + a^2)$	t cos at	$(x^2 - a^2)/(x^2 + a^2)^2$

Primjeri inverzne transformacije:

$F(x)$	$f(t)$
1	$\delta(t)$ (impulsna funkcija)
$1/x^n$	$t^{n-1}/(n-1)!$
$1/(x - a)^n$	$t^{n-1} e^{at}/(n-1)!$
$1/(1 + ax)$	$1/a \cdot e^{-t/a}$
$1/[(x - b)^2 + a^2]$	$1/a \cdot e^{bt} \sin at$
$(x - b)/[(x - b)^2 + a^2]$	$e^{bt} \cos at$
$1/[(x - b)^2 - a^2]$	$1/a \cdot e^{bt}$ sh at
$(x - b)/[(x - b)^2 - a^2]$	e^{bt} ch at

Matematička se statistika bavi metodama vrijednovanja pokusima dobivenih podataka, da bi ustanovila vjerojatne zakonitosti opažanja slučajnih pojava i veličina.

Statistička vjerojatnost

Relativna učestalost p događaja A određena je omjerom

$$p = \frac{m}{n},$$

gdje je:

n broj ponavljanja pokusa,

m broj koliko se puta događaj A zbio.

Relativna je učestalost uvijek

$$\leq p \leq 1,$$

pri čemu vrijedi:

za $p = 0$ je $m = 0$; događaj nije moguć ni pri jednom pokusu,

za $p = 1$ je $m = n$; događaj se zbiva pri svakom pokusu.

Ako je broj n vrlo velik, uzimamo, da je relativna učestalost p približno jednaka *statističkoj vjerojatnosti* događaja A pri pokusu.

Statistički prosjek

Najznačajnije karakteristike slučajnih veličina su prosječna vrijednost varijanca.

Prosječna vrijednost $\bar{x}$ je broj, oko kojeg su nanizane pokusima dobivene vrijednosti slučajne veličine

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i,$$

gdje je:

n broj istovrsnih pokusa,

x_i vrijednosti slučajne veličine pri i-tom pokusu.

Ako su vrijednosti x_i brojčano velike, možemo odabrati približnu prosječnu vrijednost X i računati s razlikama

$$\bar{x} = X + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - X).$$

Zbroj odstupanja vrijednosti slučajne veličine x_i od njene prosječne vrijednosti jednaka je 0

$$\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) = 0.$$

Mjera rasapa s^2 (varijanca) je pri n pokusa dobivena prosječna vrijednost svote kvadrata odstupanja slučajne veličine x_i od njene prosječne vrijednosti $\bar{x}$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2.$$

Standardna devijacija s je realni korijen mjere rasapa

$$s = + \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}.$$

Relativna standardna devijacija (koeficijent varijacije) je

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \qquad \left(= \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\ \%\right).$$

Ako pokusom izmjerimo dvije slučajne veličine x i y, a pri n mjerenjima dobivamo za njih vrijednosti:

$$x_1, x_2, \ldots, x_n \quad \text{i} \quad y_1, y_2, \ldots, y_n$$

to će za veličine x i y biti karakterističan broj $s_{x,y}$ (kovarijanca)

$$s_{x,y} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}).$$

*

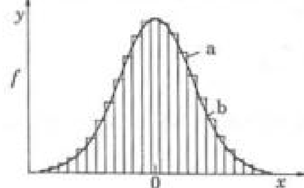
Za vrlo veliki osnovni skup ukupna je devijacija

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - m)^2},$$

gdje je: N kardinalni broj (brojnost osnovnog skupa), m srednja vrijednost.

Razdioba učestalosti

Histogram je dijagram, koji pokazuje učestalost vrijednosti slučajne veličine. U njemu se na apscisu nanose mjerene vrijednosti, a na ordinatu učestalost.



Iz grafikona razdiobe učestalosti (a) dobivamo spajanjem sredine vrhova izlomljenu crtu (b) koja se to više približava neprekidnoj krivulji, što je sitnija podjela na osi apscisa.

Pokusom dobiveni histogram je približenje zakonu razdiobe slučajne veličine.

Normalna razdioba

Pri normalnoj razdiobi krivulja učestalosti po Gaussovu zakonu dana je formulom

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2},$$

gdje je: m srednja vrijednost, σ standardna devijacija.

Gaussova krivulja proteže se od $-\infty$ do $+\infty$, a simetrična je s obzirom na vrijednost $x = m$, gdje je najveća učestalost

$$x = m, \quad y_{max} = 1/\sigma\sqrt{2\pi} = 0{,}399/\sigma.$$

Od te vrijednosti krivulja vrlo naglo pada simetrično s obje strane i ima infleksiju u točkama $x = m \pm \sigma$, gdje je učestalost

$$x = m \pm \sigma, \qquad y = 0{,}607, \qquad y_{max} = 0{,}242/\sigma.$$

Nadalje vrijedi

$$x = m \pm 2\sigma, \qquad y = 0{,}135, \qquad y_{max} = 0{,}054/\sigma$$

$$x = m \pm 3\sigma \qquad y = 0{,}011, \qquad y_{max} = 0{,}004/\sigma.$$

Kod manjih vrijednosti σ krivulja je normalne razdiobe strma, a kod većih je položenija.

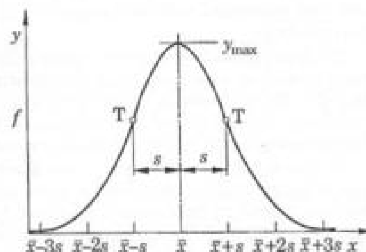
Cjelokupna površina lika među Gaussovom krivuljom i apscisnom osi

$$A = \int_{x=-\infty}^{+\infty} y\mathrm{d}x = 1,$$

a površine među Gaussovom krivuljom i apscisnom osi u pojedinim intervalima iznose:

$m \pm 0{,}67\,\sigma$	$A = 0{,}5$
$m \pm \sigma$	$A = 0{,}683$
$m \pm 2\,\sigma$	$A = 0{,}955$
$m \pm 3\,\sigma$	$A = 0{,}997.$

Gaussovu krivulju (koja vrijedi za vrlo veliki broj pokusa N) možemo dovoljnom točnošću uporabiti i pri manjem broju pokusa n, ako u njoj ukupnu devijaciju σ zamijenimo standardnom devijacijom s, a srednju vrijednost m prosječnom vrijednošću $\bar{x}$.



Druge značajnije razdiobe: binomna, Poissonova, Studentova, razdioba χ^2 itd.

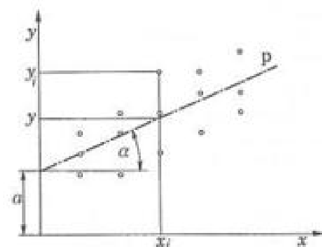
Regresija i korelacija

Krivulja koja spaja pokusom dobivenih n točaka, s apscisama $x_1, x_2, ..., x_n$ i ordinatama $y_1, y_2, ..., y_n$ nazivamo regresijskom krivuljom odgovarajućih veličina x i y.

Želimo ustanoviti funkcionalnu zavisnost (korelaciju) $y = f(x)$.

Linearna korelacija Pravac regresije (p)

$$y = a + bx$$



a odsječak na osi ordinata,
b koeficijent smjera

$$b = (y - a)/x = \tan \alpha.$$

Vrijednost broja a i b određujemo metodom najmanjih kvadrata, a otuda proizlazi

$$b = \left(\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - n \bar{x} \bar{y} \right) \Big/ \left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - n \bar{x}^2 \right)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

Jednadžbe regresijskog pravca

$$y - \bar{y} = \frac{s_{x,y}}{s_x^2}(x - \bar{x}), \qquad x - \bar{x} = \frac{s_{x,y}}{s_y^2}(y - \bar{y}).$$

Pogrješke mjerenja

Pri svakom se mjerenju, bez obzira na okolnosti, pojavljuje *mjerna pogrješka* Δx, a to je razlika između izmjerene vrijednosti x_i i stvarne vrijednosti x

$$\Delta x = x_i - x.$$

Iz izmjerene vrijednosti, koju po potrebi valja popraviti (npr. pogrješka mjernog uređaja) ili naknadno preračunati, proizlazi *mjerni rezultat*.

Sustavne pogrješke pojavljuju se pod jednakim okolnostima i uvijek s jednakom vrijednošću i jednakim predznakom. Možemo ih lako ustanoviti i odgovarajuće računski ispraviti (npr. netočnost = pogrješka mjernog uređaja).

Slučajne pogrješke javljaju se po mjestima i vremenu potpuno nesređeno, s različitim vrijednostima i predznacima (npr. zbog istrošenosti, trenja i sl.). Ne možemo ih predvidjeti, a ne možemo ni popravljati mjerne rezultate. Zbog slučajnih pogrješaka postaju mjerni rezultati nepouzdani. Ovu nepouzdanost možemo smanjiti samo većim brojem mjerenja.

U suprotnosti sa sustavnim i slučajnim pogrješkama koje prate svako mjerenje, su *mjerne pogrješke*, a to su mjerna odstupanja koja potiču od zabuna mjerioca, nepravilnog mjernog postupka, oštećenog ili pokvarenog mjernog uređaja itd. Mjerne pogrješke treba bezuvjetno izlučiti pri ocjeni mjernih rezultata.

FIZIKALNE VELIČINE I MJERNE JEDINICE

Fizikalne veličine

Fizikalne su veličine mjerljiva svojstva prirodnih pojava, tvorevina i stanja; a mjerljiva su svojstva ona koja se mogu kvantitativno iskazati. Tako su mjerljiva svojstva, tj. fizikalne veličine, na primjer, duljina, vrijeme, brzina, masa, temperatura, električni otpor itd.

Ljepota, miris i ukus nisu fizikalne veličine jer se ne mogu kvantitativno iskazati.

Veličine mogu biti skalarne (masa, temperatura, rad i dr.), vektorske (sila, brzina, ubrzanje i dr.) i tenzorske (naprezanje, deformacija, momenti tromosti).

Prema načinu definiranja, fizikalne se veličine dijele na osnovne (temeljne ili polazne) i izvedene veličine.

Osnovne se veličine definiraju opisom mjerenja. Koje će se veličine smatrati osnovnima zavisi od područja fizike, ali i o načinu na koji se pojedino područje fizike proučava. Prema dogovoru veličine pridružene osnovnim jedinicama Međunarodnog sustava (SI) smatraju se osnovnim veličinama. To su:

duljina	l, L
masa	m
vrijeme	t
električna struja	I
termodinamička temperatura	T
množina (stari naziv: količina tvari)	n
svjetlosna jakost	I_v

Izvedene se veličine tvore iz poznatih osnovnih veličina ili iz već definiranih izvedenih veličina, a definiraju se veličinskim jednadžbama pomoću fizikalnih zakona i definicijskih jednadžbi.

Izvedena je veličina brzina v definirana sljedećom jednadžbom:

$$\text{brzina} = \frac{\text{duljina}}{\text{vrijeme}}, \qquad \text{odnosno:} \qquad v = \frac{s}{t},$$

a veličina gustoća ϱ definira se kvocijentom mase m neke homogene tvari i obujma V što ga ta tvar zauzima:

$$\text{gustoća} = \frac{\text{masa}}{\text{obujam}}, \qquad \text{odnosno:} \qquad \varrho = \frac{m}{V}.$$

Ekstenzivna veličina je ona koja sadrži zbrojiva svojstva dijelova sustava. Na primjer: obujam V, masa m, Gibbsova energija G i dr.

Intenzivna veličina je ona čija vrijednost ne ovisi o veličini sustava. Na primjer: termodinamička temperatura T, tlak p, toplinska provodnost λ i dr.

Riječ *specifični* označuje veličinu koja je podijeljena masom m. Na primjer: specifični obujam $v = V/m$, specifični toplinski kapacitet $c = C/m$ i dr.

Riječ *molarni* (*množinski*) označuje veličinu koja je podijeljena množinom (količinom tvari) n. Na primjer: molarni obujam $V_m = V/n$, molarna Gibbsova energija $G_m = G/n$ i dr.

Koeficijent je veličina k u jednadžbi razmjernosti $A = k \cdot B$ kada su veličine A i B različitih dimenzija. Na primjer: koeficijent difuzije

$$\boldsymbol{J} = -\boldsymbol{D} \operatorname{grad} n.$$

Faktor je brojčana veličina k u jednadžbi razmjernosti $A = k \cdot B$ kada su veličine A i B istih dimenzija. Na primjer: faktor trenja μ u jednadžbi $F = \mu F_{tr}$.

Nazivi fizikalnih veličina tvore se dogovorom i nastoji se da svaka veličina ima samo jedan naziv.

Za znakove fizikalnih veličina rabe se pojedinačna velika i mala slova latinske abecede i drugih alfabeta.

Znakovi veličina tiskaju se kosim (*kurzivnim*) slovima bez obzira na ostali tekst.

Analitičko iskazivanje veza i ovisnosti među fizikalnim veličinama naziva se *jednadžbama među veličinama* ili *veličinskim jednadžbama*. Na primjer, veličina sila F definirana je jednadžbom:

$$F = m \cdot a,$$

gdje je m masa tvari, a a njeno ubrzanje.

Dimenzije fizikalnih veličina

Pod dimenzijom neke fizikalne veličine razumije se produkt potencija osnovnih veličina te veličine, s time da se u njezinoj definicijskoj jednadžbi zanemari njezino vektorsko ili tenzorsko značenje, te svi brojčani faktori, uključujući i matematičke znakove i predznake.

Za neku veličinu X koja je definirana produktom potencija osnovnih veličina, $X = Z\, X_1^{\alpha} X_2^{\beta} \cdots X_n^{\nu}$, njezina je dimenzija definirana produktom dimenzija:

$$\dim X = \mathsf{X}_1^{\alpha} \mathsf{X}_2^{\beta} \cdots \mathsf{X}_n^{\nu}.$$

Ovdje su $\mathsf{X}_1, \mathsf{X}_2, ..., \mathsf{X}_n$ osnovne dimenzije, a $\alpha, \beta, ..., \nu$ eksponenti tih dimenzija.

Veličine kojima su nakon kraćenja svi eksponenti u produktu dimenzija jednaki ništici, često se nazivaju *bezdimenzijskim* veličinama. Njihov dimenzijski produkt ili dimenzija jest $\mathsf{X}_1^0 \cdot \mathsf{X}_2^0 \cdots \mathsf{X}_n^0 = 1$. Takva se veličina dimenzije jedan naziva brojem.

Ako su dimenzije triju veličina duljine L, mase M i vremena T, dimenzija je veličine rada $\dim W = \mathsf{L}^2\,\mathsf{M}\,\mathsf{T}^{-2}$, a dimenzijski su eksponenti 2, 1 i -2.

Ako se za osnovne dimenzije izaberu dimenzija duljine L, dimenzija mase M, dimenzija vremena T, dimenzija električne struje I, dimenzija termodinamičke temperature Θ, dimenzija množine N i dimenzija svjetlosne jakosti J, dobiva se sustav dimenzija pridružen osnovnim jedinicama Međunarodnog sustava jedinica (SI). Prema tome, dimenzija je neke veličine X općenito:

$$\dim X = \mathsf{L}^{\alpha}\,\mathsf{M}^{\beta}\,\mathsf{T}^{\gamma}\,\mathsf{I}^{\delta}\,\Theta^{\varepsilon}\,\mathsf{N}^{\zeta}\,\mathsf{J}^{\eta}.$$

Dimenzije nekih fizikalnih veličina

Fizikalna veličina			Jedinice SI
Naziv	Definicija	Dimenzija	
ploština	$A = l^2$	L^2	m^2
obujam	$V = l^3$	L^3	m^3
brzina	$v = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$	$\mathsf{L\,T}^{-1}$	$\mathrm{m\,s}^{-1}$
kutna brzina	$\omega = \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$	T^{-1}	$\mathrm{rad/s = s}^{-1}$
ubrzanje	$a = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$	$\mathsf{L\,T}^{-2}$	$\mathrm{m\,s}^{-2}$
gustoća	$\varrho = m/V$	$\mathsf{L}^{-3}\,\mathsf{M}$	$\mathrm{m}^{-3}\,\mathrm{kg}$
sila	$\boldsymbol{F} = m\,\boldsymbol{a}$	$\mathsf{L\,M\,T}^{-2}$	$\mathrm{N = m\,kg\,s}^{-2}$
tlak	$p = F/A$	$\mathsf{L}^{-1}\,\mathsf{M\,T}^{-2}$	$\mathrm{Pa = m}^{-1}\,\mathrm{kg\,s}^{-2}$
kinetička energija	$E_k = \frac{1}{2} m\, v^2$	$\mathsf{L}^2\,\mathsf{M\,T}^{-2}$	$\mathrm{J = m}^2\,\mathrm{kg\,s}^{-2}$
entropija	$\Delta S = \Delta\Theta/\Delta T$	$\mathsf{L}^2\,\mathsf{M\,T}\,\Theta^{-1}$	$\mathrm{J/K = m}^2\,\mathrm{kg\,s}^{-2}\,\mathrm{K}^{-1}$
molarna entropija	$S_m = S/n$	$\mathsf{L}^2\,\mathsf{M\,T}^{-2}\,\Theta^{-1}\,\mathsf{N}^{-1}$	$\mathrm{J/(mol\,K) = m}^2\,\mathrm{kg\,s}^{-2}\,\mathrm{K}^{-1}\,\mathrm{mol}^{-1}$
električni potencijal	$\boldsymbol{E} = -\operatorname{grad} V$	$\mathsf{L}^2\,\mathsf{M\,T}^{-3}\,\mathsf{I}^{-1}$	$\mathrm{V = m}^2\,\mathrm{kg\,s}^{-3}\,\mathrm{A}^{-1}$
permitivnost	$\varepsilon = \boldsymbol{D}/\boldsymbol{E}$	$\mathsf{L}^{-3}\,\mathsf{M}^{-1}\,\mathsf{T}^4\,\mathsf{I}^2$	$\mathrm{F/m = m}^{-3}\,\mathrm{kg}^{-1}\,\mathrm{s}^4\,\mathrm{A}^2$
magnetni tok	$\Phi = \int \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{e}_n\, \mathrm{d}A$	$\mathsf{L}^2\,\mathsf{M\,T}^{-2}\,\mathsf{I}^{-1}$	$\mathrm{Wb = m}^2\,\mathrm{kg\,s}^{-2}\,\mathrm{A}^{-1}$
iluminancija	$E = \Delta\Phi/\Delta A$	$\mathsf{L}^{-2}\,\mathsf{J}$	$\mathrm{lx = m}^{-2}\,\mathrm{cd}$
relativna gustoća	$d = \varrho/\varrho_0$	1	1

Mjerne jedinice i brojčane vrijednosti

Mjerenje je uspoređivanje neke fizikalne veličine s dogovorno izabranom polaznom istom veličinom određene vrijednosti. Ta dogovorno izabrana polazna veličina određene vrijednosti naziva se *mjerna jedinica* ili kraće, *jedinica*. Pritom se izabranoj veličini, tj. mjernoj jedinici zanemaruje njeno vektorsko ili tenzorsko značenje i njezin predznak. Dakle, jedinice su uvijek skalari.

Mjerna jedinica i mjera dva su različita pojma, koji se često pogrješno poistovjećuju. Mjera je tijelo koje utjelovljuje mjernu jedinicu, Na primjer, štap duljine 1 metar jest mjera koja utjelovljuje duljinsku jedinicu metar, a uteg mase 1 kilogram utjelovljuje masenu jedinicu kilogram itd.

Brojčana vrijednost neke fizikalne veličine jest omjer te veličine i odabrane odgovarajuće mjerne jedinice:

$$\text{brojčana vrijednost} = \frac{\text{veličina}}{\text{jedinica}}.$$

Dakle, brojčana vrijednost kazuje koliko mjernih jedinica sadrži promatrana fizikalna veličina, odnosno to je broj s kojim treba pomnožiti mjernu jedinicu da se dobije kvantitativna vrijednost fizikalne veličine, pa se to može pisati u obliku umnoška:

$$\text{vrijednost veličine} = \text{brojčana vrijednost} \times \text{mjerna jedinica}.$$

Ako se neka veličina označi znakom X, onda se taj odnos iskazuje općom jednadžbom:

$$X = \{X\} \cdot [X],$$

gdje je $[X]$ mjerna jedinica veličine X, a $\{X\}$ brojčana vrijednost veličine X iskazana jedinicom $[X]$.

Međutim, veličinske jednadžbe osim veličina često sadrže i neke faktore koji ovise o značenju fizikalnih veličina, ali ne ovise o njezinim jedinicama, pa gornja jednadžba dobiva oblik:

$$X = Z\,\{X\} \cdot [X],$$

gdje je Z brojčani faktor.

Nazivi i znakovi mjernih jedinica

Nazivi i znakovi mjernih jedinica su normirani. Neke mjerne jedinice imaju i posebne nazive, najčešće prema prezimenima zaslužnih svjetskih znanstvenika. Na primjer, njutn (N), vat (W), amper (A) itd.

Nazivi izvedenih jedinica koje nemaju svoga posebnog naziva tvore se od naziva jedinica iz kojih su izvedene. Jedinice koje nastaju množenjem govore se onako kako se i pišu, tj. bez riječi puta. Jedinice koje nastaju dijeljenjem izriču se riječju »po«, osim onih koje ovise o vremenu: one se izriču riječima »u« ili »na«.

Na primjer:

jedinica momenta sile: newton × metar = newtonmetar = N m,

jedinica gustoće: $\frac{\text{kilogram}}{\text{kubni metar}}$ = kilogram po kubnom metru = $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$,

jedinica brzine: $\frac{\text{metar}}{\text{sekunda}}$ = metar u sekundi = $\frac{\text{m}}{\text{s}}$,

jedinica brzine: $\frac{\text{kilometar}}{\text{sat}}$ = kilometar na sat = $\frac{\text{km}}{\text{s}}$.

Za znakove mjernih jedinica rabe se mala i velika slova latinske abecede i grčko slovo omega (Ω). Na primjer, m (metar), s (sekunda), N (njutn) itd. Ako više jedinica ima u nizu isto početno slovo, onda se znakovima ostalih jedinica dodaje još jedno, malo slovo iz naziva. Tako je za jedinicu snage vat znak W, a za jedinicu magnetnog toka veber znak je Wb itd.

Neke se izvansustavne jedinice označuju i posebnim znakovima. Tako su znakovi kutnih jedinica: ° za stupanj, ' za minutu, " za sekundu i ^{g} za gon. Znak je za stupnjeve raznih ljestvica podignuti kružić (°, kao i za kutni stupanj) koji se dodaje početnom slovu naziva jedinice odnosno ljestvice. Na primjer, za Celzijev stupanj znak je °C, za Englerov stupanj znak je °E itd.

Nazivi i znakovi angloameričkih jedinica pišu se malim slovima. Iznimka je britanska jedinica za toplinu »British thermal unit«, koja ima znak Btu, dakle s velikim početnim slovom. Na primjer:

foot, znak:	ft
foot per second, znak:	ft/s
square yard, znak:	yd^2 ili sq yd
British thermal unit, znak:	Btu.

Iza znaka jedinice ne stavlja se točka ako nije konac rečenice. Znakovi mjernih jedinica tiskaju se uvijek uspravnim (okomitim) slovima, bez obzira na okolni tekst. U izrazima u kojima se prikazuju podatci o fizikalnim veličinama, znakovi jedinica uvijek se pišu iza brojčane vrijednosti, s time da se između brojčane vrijednosti i jedinice ostavlja mali razmak i ne stavlja se znak množenja. Samo se znakovi izvansustavnih jedinica za kut pišu tik uz brojčanu vrijednost. Na primjer:

$F = 275$ N, ali ne: $F = 275 \cdot$ N.

$\alpha = 25° 45' 30"$,

$t = 30$ °C.

Opći znak za neodređenu jedinicu neke veličine piše se tako da se znak za tu veličinu stavi u uglatu zagradu. Na primjer:

$[X]$ je opća jedinica za veličinu X,

$[l]$ je opća jedinica za veličinu duljinu l, a to može biti km (kilometar), m (metar) itd.,

$[p]$ je opća jedinica za veličinu tlaka p, a to može biti Pa (paskal), mPa (milipaskal) itd.

Nije dopušteno znakove stvarnih, tj. već određenih jedinica stavljati u uglate zagrade.

Opći znak za brojčanu vrijednost veličine piše se tako da se znak za tu veličinu stavi u vitičastu zagradu. Na primjer:

$\{X\}$ je opća brojčana vrijednost veličine X iskazane jedinicom $[X]$,

$\{l\}$ je opća brojčana vrijednost veličine duljine l iskazane jedinicom $[l]$,

$\{p\}$ je opća brojčana vrijednost veličine tlaka p iskazane jedinicom $[p]$.

Stvarne brojčane vrijednosti ne stavljaju se u vitičaste zagrade. Pri pisanju umnožaka opće brojčane vrijednosti i opće jedinice može se izostaviti znak množenja ako to ne bi stvaralo zabunu. Na primjer, udaljenost je između dvaju gradova (l) 450 kilometara:

$$l = \{l\} \cdot [l] = \{l\}\,[l] = 450 \text{ km},$$

gdje je $\{l\} = 450$ brojčana vrijednost, a $[l]$ = km jedinica duljine.

Međunarodni sustav jedinica (SI)

Godine 1960. Generalna konferencija za utege i mjere (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM) prihvatila je na svome jedanaestom zasjedanju Međunarodni sustav jedinica (Système International d'Unités). Konferencija je istodobno zaključila da skraćenica toga sustava na svim jezicima bude SI, prema njegovu izvornom nazivu na francuskom jeziku (Système International).

Međunarodni sustav jedinica (SI) čine:

a) osnovne jedinice,

b) izvedene jedinice,

c) dopunske jedinice.

Osnovne jedinice Međunarodnog sustava jedinica (SI)

Fizikalna veličina		Osnovna jedinica SI		
Naziv	Znak	Naziv	Znak	Definicija
duljina	l, L	metar	m	Metar je duljina puta što ga svjetlost prijeđe u praznini (vakuumu) za vrijeme od 1/299 792 458-og dijela sekunde. (1983.)
masa	m	kilogram	kg	Kilogram je jedinica mase; on je jednak masi međunarodnog prakilograma. (1901.)
vrijeme	t	sekunda	s	Sekunda je jednaka trajanju 9 192 631 770 perioda zračenja koje odgovara prijelazu između dviju hiperfinih razina osnovnog stanja atoma cezija 133. (1967.)

Osnovne jedinice Međunarodnog sustava jedinica (SI) *(konac)*

Fizikalna veličina		Osnovna jedinica SI		
Naziv	Znak	Naziv	Znak	Definicija
jakost električne struje	I	amper	A	Amper je stalna električna struja koja bi, kad bi protjecala dvama ravnim usporednim vodičima beskonačne duljine i zanemariva okruglog presjeka, a koji se nalaze u praznini (vakuumu) razmaknuti 1 metar, proizvodila među njima silu od 2×10^{-7} njutna po metru duljine. (1948.)
termodinamička temperatura	T	kelvin	K	Kelvin je 273,16-i dio termodinamičke temperature trojne točke vode. (1967.)
množina, (prijašnji naziv: količina tvari)	n	mol	mol	Mol je množina nekog sustava koji sadrži toliko elementarnih jedinki koliko ima atoma u 0,012 kilograma ugljika 12. (1971.) (Kad se rabi mol, elementarne jedinke treba navesti: to mogu biti atomi, molekule, ioni, elektroni i druge čestice ili skupine takvih čestica.)
svjetlosna jakost	I_v	kandela (candela)	cd	Kandela je svjetlosna jakost u danom smjeru onog izvora koji odašilje jednobojno zračenje frekvencije 540×10^{12} herca i kojemu je jakost zračenja u tom smjeru 1/683 vata po steradijanu. (1979.)

Napomena: Uz termodinamičku temperaturu rabi se i Celzijeva temperatura (znak: t ili ϑ) definirana jednadžbom:

$$t = T - T_0,$$

gdje je T_0 = 273,15 K po definiciji. Jedinica je za Celzijevu temperaturu Celzijev stupanj (°C), koji je jednak jedinici kelvin:

$$\text{Celzijev stupanj} = \text{kelvin},$$
$$°\text{C} = \text{K}.$$

Celzijev stupanj samo je, dakle, drugi naziv za kelvin. Prema tome, temperaturna se razlika može iskazivati u kelvinima (K) i u Celzijevim stupnjevima (°C):

$$\Delta T = \Delta t = \Delta\vartheta.$$

Izvedene jedinice Međunarodnog sustava jedinica (SI) tvore se po pravilima koherencije, od osnovnih jedinica SI, ili od jedinica već tvorenih iz osnovnih jedinica, međusobnim množenjem ili dijeljenjem. Tako nastaju međujedinične jednadžbe, analogne veličinskim jednadžbama, koje međusobno povezuju ili definiraju pripadne fizikalne veličine. Na primjer, brzina v je definirana promjenom puta s u vremenu t, dakle:

$$v = s/t.$$

Analogan oblik ima i opća međujedinična jednadžba brzine:

$$[v] = [s]/[t],$$

gdje znakovi veličina u uglatim zagradama $[v]$, $[s]$ i $[t]$ predstavljaju opće znakove jedinica za veličine v, s i t.

Ili, veličina sila je definirana jednadžbom:

$$F = m\,a,$$

a opća je međujedinična jednadžba sile:

$$[F] = [m]\,[a]\,.$$

U koherentnom (skladnom) sustavu jedinica sve su izvedene jedinice u međusobnom odnosu $1 \times 1 = 1$ ili $1 : 1 = 1$.

Na primjer:

izvedena jedinica SI za ploštinu (m²): $[A]_{SI} = 1\ \mathrm{m} \cdot 1\ \mathrm{m} = 1\ \mathrm{m}^2$,

izvedena jedinica SI za brzinu (m/s): $[v]_{SI} = \dfrac{1\ \mathrm{m}}{1\ \mathrm{s}} = 1\ \dfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$,

izvedena jedinica SI za gustoću (kg/m³): $[\varrho]_{SI} = \dfrac{1\ \mathrm{kg}}{1\ \mathrm{m}^3} = 1\ \dfrac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$.

Isti oblik ima i brojčana jednadžba brzine:

$$\{v\} = \{s\}/\{t\},$$

gdje znakovi veličine u vitičastim zagradama $\{v\}$, $\{s\}$ i $\{t\}$ predstavljaju opće znakove brojčanih iznosa veličina v, s i t.

Primjer. Neko tijelo ima masu $m = 4$ kg i giba se brzinom $v = 5$ m/s. Kinetička je energija definirana jednadžbom:

$$E_k = \frac{1}{2}\,m\,v^2, \quad \text{odnosno} \quad E_k = Z\,m\,v^2$$

gdje je $1/2 = Z$ brojčani faktor.

Uvrštenjem zadanih vrijednosti u jednadžbu za kinetičku energiju, dobiva se njena vrijednost:

$$E_k = Z\,m\,v^2 = \frac{1}{2}\,m\,v^2 = \frac{1}{2} \cdot 4\ \mathrm{kg} \cdot (5\ \mathrm{m/s})^2 = 2\ \mathrm{kg} \cdot 25\ \mathrm{m^2/s^2} = 50\ \mathrm{kg\ m^2/s^2}.$$

Ova se jednadžba može pisati i u razvijenom obliku:

$$E_k = \{E_k\}\,[E_k] = Z\,\{m\}\,[m] \cdot \{v\}^2\,[v]^2.$$

Iz čega slijedi brojčana jednadžba:

$$\{E_k\} = Z\,\{m\}\,\{v\}^2.$$

Kako su brojčane vrijednosti zadane, tj. $\{m\} = 4$, $\{v\} = 5$ i $Z = \dfrac{1}{2}$, njihovim uvrštenjem u brojčanu jednadžbu dobiva se brojčana vrijednost za kinetičku energiju:

$$\{E_k\} = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 5^2 = 2 \cdot 25 = 50.$$

Odgovarajuća je jednadžba među jedinicama:

$$[E_k] = [m]\,[v]^2.$$

Budući su zadane jedinice $[m]$ = kg i $[v]$ = m/s i uvrštenjem tih jedinica u jednadžbu među jedinicama dobiva se jedinica za kinetičku energiju:

$$[E_k] = [m]\,[v]^2 = \mathrm{kg\ m^2/s^2}.$$

Ako se vrijednost veličine kinetičke energije iskaže umnoškom brojčane vrijednosti $\{E_k\}$ i odgovarajuće mjerne jedinice $[E_k]$ dobiva se kinetička energija:

$$E_k = \{E_k\}\,[E_k] = 50\ \mathrm{kg\ m^2/s^2}.$$

Dakle, rezultat je isti bez obzira kako ga računali.

Neke su izvedene jedinice SI iz praktičnih razloga dobile posebne nazive i svoje znakove. One su definirane međujediničnim jednadžbama.

Izvedene jedinice Međunarodnog sustava (SI) s posebnim nazivima i znakovima

Fizikalna veličina		Izvedena jedinica SI s posebnim nazivom i znakom			
Naziv	Znak	Naziv	Znak	Iskazana drugim jedinicama SI	Iskazana osnovnim jedinicama SI
frekvencija	f, ν	herc (hertz)	Hz		$\mathrm{s^{-1}}$
sila	F	njutn (newton)	N	J/m	$\mathrm{m\ kg\ s^{-2}}$
tlak	p	paskal (pascal)	Pa	$\mathrm{N/m^2}$, $\mathrm{J/m^3}$	$\mathrm{m^{-1}\ kg\ s^{-2}}$
energija, rad, toplina	E, W, Q	džul (joule)	J	N m	$\mathrm{m^2\ kg\ s^{-2}}$
snaga	P	vat (watt)	W	J/s	$\mathrm{m^2\ kg\ s^{-3}}$
električni naboj	Q	kulon (coulomb)	C		s A
električni napon	U (V)	volt	V	W/A, J/C	$\mathrm{m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}}$
električni kapacitet	C	farad	F	C/V	$\mathrm{m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2}$
električni otpor	R	om (ohm)	Ω	V/A	$\mathrm{m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}}$
električna vodljivost	G	simens (siemens)	S	A/V, Ω^{-1}	m-2 $\mathrm{kg^{-1}\ s^3\ A^2}$
magnetni tok	Φ	veber (weber)	Wb	V s	$\mathrm{m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}}$
magnetna indukcija	B	tesla	T	$\mathrm{Wb/m^2}$, $\mathrm{Vs\ m^{-2}}$	$\mathrm{kg\ s^{-2}\ A^{-1}}$
induktivnost	L	henri (henry)	H	Wb/A, $\mathrm{V\ A^{-1}\ s}$	$\mathrm{m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}}$
Celzijeva temperatura	t, ϑ	Celzijev stupanj	°C		K
svjetlosni tok, luminacijski tok	Φ, Φ_v	lumen	lm		cd sr [1]
osvjetljenje, iluminancija	E, E_v	luks (lux)	lx	$\mathrm{lm/m^2}$	$\mathrm{m^{-2}}$ cd sr [1]
aktivnost	A	bekerel (becquerel)	Bq		$\mathrm{s^{-1}}$
apsorbirana doza [2]	D	grej (gray)	Gy	J/kg	$\mathrm{m^2\ s^{-2}}$
dozni ekvivalent [2]	H, D_1	sivert (sievert)	Sv	J/kg	$\mathrm{m^2\ s^{-2}}$

[1] Znak sr potreban je da bi se razlikovao svjetlosni tok (lumen) od svjetlosne jakosti (kandela).

[2] Dozni ekvivalent jednak je apsorbiranoj dozi pomnoženoj s bezdimenzijskim faktorima kojima se definira određeni biološki učinak zračenja. Iako su jedinice grej i sivert iskazane istim osnovnim jedinicama SI, one opisuju pojmovno različite veličine.

Jedinica SI za ravninski kut radijan (znak: rad) i jedinica za ugao (prostorni kut) steradijan (znak: sr) čine posebnu skupinu – dopunske jedinice SI, predočeni u sljedećoj tablici.

Dopunske jedinice Međunarodnog sustava (SI)

Fizikalna veličina		Dopunska jedinica SI			
Naziv	Znak	Naziv	Znak	Međujedinična jednadžba	Definicija
kut, (ravninski kut)	$\alpha, \beta, \gamma, \ldots$	radijan	rad	rad = m/m = 1	Radijan je kut između dvaju polumjera koji na kružnici omeđuju luk duljine jednake polumjeru te kružnice (1 rad = 1).
ugao, (prostorni kut)	Ω, ω	steradijan	sr	sr = m^2/m^2 = 1	Steradijan je ugao stošca s vrhom u središtu kugle koji na plohi kugle omeđuje ploštinu jednaku ploštini kvadrata kojemu je stranica jednaka polumjeru te kugle (1 sr = 1).

Decimalne mjerne jedinice

Jedinice Međunarodnog sustava (SI) ponekad su neprikladno malene ili pak neprikladno velike za iskazivanje kvantitativnih vrijednosti fizikalnih veličina s kojima se susrećemo u svakodnevnom životu i znanosti. Da bi se izbjeglo to neprikladno prikazivanje veličina jedinicama kojima brojčane vrijednosti imaju mnogo znamenaka, množenjem imenovanih osnovnih i izvedenih jedinica SI i drugih, posebnih jedinica faktorima $10^{\pm1}$, $10^{\pm2}$ i $10^{\pm3k}$ (gdje je k = 1, 2, ..., 8) tvore se decimalni dijelovi jedinica (manji od 1) i decimalni višekratnici jedinica (veći od 1), tj. tvore se manje i veće jedinice, koje imaju posebne nazive i posebne znakove.

Nazivi i znakovi tih jedinica tvore se tako da se polaznoj jedinici, umjesto faktora $10^{\pm1}$, $10^{\pm2}$ i $10^{\pm3k}$, ispred naziva jedinice doda odgovarajući predmetak, a ispred znaka jedinice odgovarajući znak predmetka. Ovo združivanje naziva predmetaka i polaznih jedinica, te njihovih znakova, tvori nove jedinice. Tako nastale mjerne jedinice zajednički se nazivaju *decimalne mjerne jedinice* ili skraćeno *decimalne jedinice*.

Na primjer:

1 000 metara = 1 000 m = 10^3 metara = 10^3 m = kilometar = km,

0,001 metar = 0,001 m = 10^{-3} metra = 10^{-3} m = milimetar = mm.

Ovdje su kilometar i milimetar decimalne jedinice za duljinu, a km i mm njihovi znakovi; kilo i mili su predmetci, a k i m njihovi znakovi, tj. kilo = k = 10^3, a mili = m = 10^{-3}.

Predmetci jedinica također imaju svoje nazive i znakove, koji se dogovorno utvrđuju. Generalna konferencija za utege i mjere (CGPM) nekoliko je puta prihvaćala nazive i znakove predmetaka za tvorbu decimalnih jedinica za faktore $10^{\pm1}$, $10^{\pm2}$ i $10^{\pm3k}$, koji su predočeni u sljedećoj tablici.

Predmetci (prefiksi) Međunarodnog sustava jedinica (SI) za tvorbu decimalnih jedinica [1]

Predmetak		Faktor	Brojčana vrijednost
Naziv	Znak		
jota (yotta)	Y	10^{24}	1 000 000 000 000 000 000 000 000
zeta (zetta)	Z	10^{21}	1 000 000 000 000 000 000 000
eksa (exa)	E	10^{18}	1 000 000 000 000 000 000
peta	P	10^{15}	1 000 000 000 000 000
tera	T	10^{12}	1 000 000 000 000
giga	G	10^{9}	1 000 000 000
mega	M	10^{6}	1 000 000
kilo	k	10^{3}	1 000
hekto (hecto)	h	10^{2}	100
deka (deca)	da	10	10
deci	d	10^{-1}	0,1
centi	c	10^{-2}	0,01
mili (milli)	m	10^{-3}	0,001
mikro (micro)	µ	10^{-6}	0,000 001
nano	n	10^{-9}	0,000 000 001
piko (pico)	p	10^{-12}	0,000 000 000 001
femto	f	10^{-15}	0,000 000 000 000 001
ato (atto)	a	10^{-18}	0,000 000 000 000 000 001
zepto	z	10^{-21}	0,000 000 000 000 000 000 001
jokto (yocto)	y	10^{-24}	0,000 000 000 000 000 000 000 001

Primjeri: nano = n = 10^{-9} = 0,000 000 001; mega = M = 10^6 = 1 000 000.

Naziv predmetka i naziv polazne jedinice pišu se sastavljeno kao jedna riječ ako se naziv jedinice sastoji od jedne riječi. Znak predmetka i znak polazne jedinice također se pišu sastavljeno, bez razmaka.

Na primjer:

milinjutn = mN = 10^{-3} N = 0,001 N,

kilometar = km = 10^3 m = 1 000 m.

U složenom nazivu izvedene jedinice predmetak se dodaje nazivu prve jedinice umnoška ili brojniku razlomka. Na primjer:

milinjutnmetar = mN m = 10^{-3} N m = 0,001 N m,

centimetar u sekundi = cm/s = 10^{-2} m/s = 0,01 m/s.

[1] ISO 31-0:1992(E)

Znakovi predmetaka tiskaju se uspravnim slovima kao i znakovi jedinica. Ostavljanje razmaka između znaka predmetka i znaka odgovarajuće jedinice mijenja značenje onim decimalnim jedinicama koje imaju iste znakove kao i neke izvedene jedinice. Na primjer:

$$\text{mN} = \text{milinjutn} = 10^{-3}\ \text{N};$$

isti znakovi pisani s razmakom znače: m N = metarnjutn;

$$\text{ms} = \text{milisekunda} = 10^{-3}\ \text{s};$$

isti znakovi pisani s razmakom znače: m s = metarsekunda.

Osnovna jedinica SI mase kilogram (znak: kg) povijesno je decimalna jedinica, pa se od nje *ne* tvore decimalne jedinice, jer se jednoj jedinici istodobno može dodati samo jedan predmetak. Decimalne jedinice mase tvore se od jedinice gram (znak: g). Na primjer:

dekagram $= 10^{1}\ \text{g} = \text{dag}$	decigram $= 10^{-1}\ \text{g} = \text{dg}$
kilogram $= 10^{3}\ \text{g} = \text{kg}$	centigram $= 10^{-2}\ \text{g} = \text{cg}$
megagram $= 10^{6}\ \text{g} = \text{Mg}$	miligram $= 10^{-3}\ \text{g} = \text{mg}$.

ali nikako: $10^{-6}\ \text{kg} = \mu\text{kg}$ = mikrokilogram!

Pri potenciranju decimalnih jedinica eksponent potencije piše se samo iznad znaka jedinice, ali se proteže i na znak predmetka, tj. vrijedi za cijelu decimalnu jedinicu. Na primjer:

$$1\ \text{cm}^2 = 1\ \text{cm} \cdot 1\ \text{cm} = 1\ (\text{cm})^2 = 1\ (10^{-2}\ \text{m})^2 = 10^{-4}\ \text{m}^2,$$

ali ne: $1\ \text{cm}^2 = 1\ \text{c(m)}^2 = 10^{-2}\ \text{m}^2$;

$$1\ \text{N/mm}^2 = 1\ \text{N/(mm)}^2 = 1\ \text{N/}(10^{-3}\ \text{m})^2 = 1\ \text{N/}(10^{-6}\ \text{m}^2) = 10^{6}\ \text{N/m}^2 = \text{MN/m}^2,$$

ali ne: $1\ \text{N/mm}^2 = 1\ \text{N/m(m)}^2 = 1\ \text{N/}(10^{-3}\ \text{m}^2) = 10^{3}\ \text{N/m}^2 = \text{kN/m}^2$.

I negativni eksponent vrijedi za cijelu decimalnu jedinicu, tzv. recipročnu decimalnu jedinicu. Na primjer:

recipročni kilopaskal $= \text{kPa}^{-1} = (\text{kPa})^{-1} = (10^{3}\ \text{Pa})^{-1} = 10^{-3}\ \text{Pa}^{-1}$,

ali ne: $\text{kPa}^{-1} = 10^{3}\ \text{Pa}^{-1}$;

recipročna mikrosekunda $= \mu\text{s}^{-1} = (\mu\text{s})^{-1} = (10^{-6}\ \text{s})^{-1} = 10^{6}\ \text{s}^{-1}$,

ali ne: $\mu\text{s}^{-1} = 10^{-6}\ \text{s}^{-1}$.

Zakonite iznimno dopuštene mjerne jedinice izvan sustava SI

Osim primjene jedinica SI, iznimno se dopušta uporaba i nekih jedinica izvan sustava SI koje su toliko uvriježene u gospodarstvu i znanosti da bi njihovo zabranjivanje dovelo do velikih problema. U sljedećoj tablici predočene su iznimno dopuštene jedinice i njihova uporaba.

Iznimno dopuštene jedinice izvan SI s posebnim nazivima i znakovima

Fizikalna veličina		Mjerna jedinica			Dopušteno područje uporabe
Naziv	Znak	Naziv	Znak	Definicija	
duljina	l, L	morska milja		1 morska milja = 1 852 m (točno)	pomorski, riječni i zračni promet
		astronomska jedinica	AU [1]	$1\ \text{AU} = 1{,}495\ 978\ 7 \times 10^{11}\ \text{m}$	astronomija
ploština, površina	A, S	ar	a	$1\ \text{a} = \text{dam}^2 = 100\ \text{m}^2 = 10^2\ \text{m}^2$ (točno)	zemljišna ploština
		hektar	ha	$1\ \text{ha} = 1\ \text{hm}^2 = 10\ 000\ \text{m}^2 = 10^4\ \text{m}^2$	
obujam, volumen	V	litra [2]	l, L	$1\ \text{L} = 1\ \text{dm}^3 = 10^{-3}\ \text{m}^3$	
kut, (ravninski kut)	$\alpha, \beta, \gamma, \ldots$	stupanj	°	$1° = \frac{\pi}{180}\ \text{rad} = 0{,}017\ 453\ 3\ \text{rad}$	
		minuta	′	$1' = (1/60)° = (\pi/10\ 800)\ \text{rad}$	
		sekunda	″	$1'' = (1/60)' = (1/3\ 600)° = (\pi/648\ 000)\ \text{rad}$	
		gon, grad	gon, ^{g}	$1\ \text{gon} = 1^{g} = (\pi/200)\ \text{rad} = 0{,}015\ 707\ 96\ \text{rad}$	
masa	m	jedinstvena atomna masena jedinica [3]	u	$1\ \text{u} \approx 1{,}660\ 540 \times 10^{-27}\ \text{kg}$	fizika i kemija
		metrički karat	k	$1\ \text{k} = 200\ \text{mg} = 0{,}000\ 2\ \text{kg} = 2 \times 10^{-4}\ \text{kg}$	draguljarstvo
		gram	g	$1\ \text{g} = 0{,}001\ \text{kg} = 10^{-3}\ \text{kg}$	
		tona	t	$1\ \text{t} = 1\ \text{Mg} = 1\ 000\ \text{kg} = 10^{3}\ \text{kg}$	
vrijeme	t	minuta	min	$1\ \text{min} = 60\ \text{s}$	
		sat	h	$1\ \text{h} = 60\ \text{min} = 3\ 600\ \text{s}$	
		dan	d	$1\ \text{d} = 24\ \text{h} = 86\ 400\ \text{s}$	

[1] AU je kratica za engleski naziv *astronomical unit*.

[2] Generalna konferencija za utege i mjere (CGPM) prihvatila je na svome 12. zasjedanju 1964. godine novu definiciju za jedinicu obujma litru (znak: l, L) koja glasi: litra = kubni decimetar = dm^3 (točno), tj. riječ litra samo je poseban naziv za kubni decimetar.

[3] Jedinstvena atomna masena jedinica (u) jednaka je 1/12 atomne mase nuklida ugljika 12 (^{12}C): $1\ \text{u} = m_a(^{12}\text{C})/12$.

Iznimno dopuštene jedinice izvan SI s posebnim nazivima i znakovima *(konac)*

Fizikalna veličina		Mjerna jedinica			Dopušteno područje uporabe
Naziv	Znak	Naziv	Znak	Definicija	
brzina	v, c, u, w	čvor, (knot)	kn	1 kn = 1 morska milja na sat = 1 852 m/h (točno) = 0,514 444 m/s	pomorski i zračni promet
duljinska masa, duljinska gustoća	ϱ_l	teks	tex	1 tex = 1 g/km = 10^{-6} kg/m	tekstilna vlakna i konac
tlak	p	bar	bar	1 bar = 1,019 72 at = 0,986 923 atm = 10^5 Pa	
		milimetar živina stupca	mmHg	1 mmHg = 13,595 1 mmH_2O =133,3224Pa	tlak tjelesnih tekućina
energija	Q, E, W	elektronvolt [4]	eV	1 eV = 1,602 177 × 10^{-19} J	posebna područja
snaga	Q, P_Q	var	var	1 var = 1 W	reaktivna (jalova) snaga izmjenične električne struje

CGS-sustav mjernih jedinica

CGS-sustav mjernih jedinica (naziva se i fizikalni sustav) jest skup međusobno koherentnih mjernih jedinica koje se izvode iz tri osnovne jedinice. To su:

a) jedinica duljine: centimetar (znak: cm), cm = 10^{-2} m,
b) jedinica mase: gram (znak: g), g = 10^{-3} kg,
c) jedinica vremena: sekunda (znak: s), s = s.

Naziv CGS-sustav potječe od početnih slova osnovnih mjernih jedinica, tj. od jedinica centimetar, gram i sekunda. Imao je vrlo značajnu ulogu u razvoju znanosti, a osobito fizike.

U sljedećoj tablici predočene su izvedene jedinice CGS-sustava s posebnim nazivima i njihovim znakovima.

[4] Jedinica elektronvolt (eV) jednaka je kinetičkoj energiji što ju dobije elektron prolazeći u vakuumu potencijalnu razliku od 1 volt: 1 eV = (*e*/C) J.
Napomena: Vrijednosti jedinstvene atomne masene jedinice (u) i jedinice elektronvolt (eV) u jedinicama SI dobivene su eksperimentalno.

Izvedene mjerne jedinice CGS-sustava s posebnim nazivima i njihovim znakovima

Fizikalna veličina		Mjerna jedinica		
Naziv	Znak	Naziv	Znak	Iskazana jedinicama SI
rad, energija	W, E	erg	erg	1 erg = 10^{-7} J
sila	F	dyn	dyn	1 dyn = 10^{-5} N
(dinamička) viskoznost	η	poise	P	1 P = dyn s/cm^2 = 0,1 Pa s
kinematička viskoznost	ν	stokes	St	1 St = cm^2/s = 10^{-4} m^2/s
magnetna indukcija	B	gauss	Gs, G	1 Gs ≙ 10^{-4} T [1]
jakost magnetnog polja	H	oersted	Oe	1 Oe ≙ (1000/4π) A/m [1]
magnetni tok	Φ	maxwell	Mx	1 Mx ≙ 10^{-8} Wb [1]
svjetljivost, luminancija	$L, (L_v)$	stilb	sb	1 sb = cd/cm^2 = 10^4 cd/m^2
osvjetljenje, iluminancija	$E, (E_v)$	phot	ph	1 ph = 10^4 lx

Tehnički sustav mjernih jedinica (TS)

Tehnički sustav mjernih jedinica mehanike temelji se na tri osnovne jedinice:

a) jedinica duljine: metar (znak: m),
b) jedinica vremena: sekunda (znak: s),
c) jedinica sile: kilopond (znak: kp).

Tehnički sustav mjernih jedinica (TS) nastao je početkom XX. stoljeća, kad još nisu bili jasno razgraničeni pojmovi veličina mase i težine. Naime, obje te veličine, masa tijela i težina tijela, često su iskazivane »kilogramima«. Stoga je Generalna konferencija za utege i mjere (CGPM) na svome trećem zasjedanju godine 1901. ponovno naglasila:

1. Kilogram je mjerna jedinica *mase*; on je jednak masi međunarodnog prakilograma, koji je pohranjen u BIPM u Sèvresu kraj Pariza.

2. Težina tijela je umnožak njegove mase i težnog ubrzanja na Zemlji.

3. Usvojena je vrijednost normiranog (normalnog) težnog ubrzanja g_n = 9,860 65 m/s^2 izmjerenog na mjestu gdje je pohranjen međunarodni prakilogram (Sèvres).

[1] ≙ odgovara

Tako je normirana težina međunarodnog prakilograma jednaka umnošku njegove mase od 1 kilogram i normiranog (normalnog) težnog ubrzanja g_n = 9,806 65 m/s². Prema tome, normirana težina međunarodnog prakilograma iznosi:

$$G_n = m\, g_n = 1\ \text{kg} \cdot 9{,}806\ 65\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9{,}\ 806\ 65\ \text{kg m/s}^2\ \text{(točno)}.$$

Budući da naziv *težina* označuje veličinu iste prirode kao i sila, to je težina G_n prihvaćena kao jedinica sile i nazvana *kilogram-sila*, sa znakom kg^*.

Znakovi »kg« za jednicu mase i »kg^*« za jedinicu sile i dalje su unosili zabunu, jer je bilo teško razlikovati o kojim se veličinama ili jedinicama, odnosno kilogramima radi, to više što su se ti znakovi katkad rabili obrnuto. Stoga je 1934. godine jedinica *kilogram-sila* (kg^*) nazvana *kilopond* (znak: kp):

$$\text{kilogram-sila} = \text{kilopond}, \qquad \text{odnosno:} \qquad \text{kg}^* = \text{kp},$$

tj. kilopond = kp = 9,806 65 kg m/s² (točno) = 9,806 65 N (točno), jer je N = 9,806 65 kg m/s².

Valja napomenuti da je i tehnički sustav koherentan, ali nikada nije bio međunarodno normiran.

Mjerna jedinica »konjska snaga« (znak: KS) izvansustavna je mjerna jedinica, koja nikad nije bila međunarodno normirana, a bila je vrlo dugo u uporabi:

$$\text{konjska snaga} = \text{KS} = 75\ \text{kp m/s (točno)}.$$

Budući da je 1 kp m/s = 9,806 65 W (točno), to je:

$$1\ \text{KS} = 75\ \text{kp m/s} = 75 \cdot 9{,}806\ 65\ \text{W} = 735{,}498\ 75\ \text{W (točno)}.$$

Angloamerički sustavi mjernih jedinica

U zemljama engleskoga jezičnog područja u uporabi su osim Međunarodnog sustava mjernih jedinica (SI) još dva mjerna sustava, i to:

a) US Customary System; osnovne jedinice su yard i avoirdupois pound. U tom sustavu nema primarnih (tvarnih) etalona, nego su osnovne jedinice definirane s pomoću etalona metarskog sustava.

b) British Imperial System (UK – United Kingdom); osnovne su jedinice također yard i pound (avdp), definirane do 1959. godine s pomoću primarnih (tvarnih) etalona. Te su se godine sporazumjeli i USA i UK da rabe isti, tzv. međunarodni yard i pound, koji su definirani na osnovi metarskih etalona, kao u sustavu US.

Fizikalne veličine i jedinice Međunarodnog sustava (SI)

Prostorne, vremenske i periodične veličine i jedinice SI

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
duljina (l, L)		metar	m
širina (b)		metar	m
visina (h)		metar	m
debljina (d, δ)		metar	m
polumjer (r, R)		metar	m
promjer (d, D)		metar	m
put, duljina puta (s)		metar	m
razmak, udaljenost (d, r)		metar	m
kartezijske koordinate (x, y, z)		metar	m
polumjer zakrivljenosti (ϱ)		metar	m
zakrivljenost ($\varkappa$)	$\varkappa = 1/\varrho$	recipročni metar	1/m
ploština, površina (A, (S))	$A = l\, b$	četvorni metar, kvadratni metar	m²
obujam, volumen (V)	$V = b\, h\, d$	kubni metar	m³
kut, (ravninski kut) (α, β, γ, ...)	$\varphi = s/r$	radijan	rad (= 1)
ugao, prostorni kut (Ω)	$\Omega = A/r^2$	steradijan	sr (= 1)
vrijeme, (trajanje) (t)		sekunda	s
brzina (v, u, w, c)	$v = \dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$	metar u sekundi	m/s
ubrzanje, (akceleracija) (a)	$a = \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$	metar u sekundi na kvadrat	m/s²
težno ubrzanje, ubrzanje slobodnog pada (g)	$g = \left(\dfrac{\partial^2 h}{\partial t^2}\right)_{t=0,\, p=0}$	metar u sekundi na kvadrat	m/s²
normirano težno ubrzanje, normirano ubrzanje slobodnog pada (g_n) [1]		metar u sekundi na kvadrat	m/s²
trzaj (b)	$b = \dfrac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t}$	metar u sekundi na treću	m/s³
kutna brzina, kutna frekvencija (ω)	$\omega = \dfrac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$	radijan u sekundi	rad/s

[1] g_n = 9,806 65 m/s² (točno).

Prostorne, vremenske i periodične veličine i jedinice SI (*konac*)

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
kutno ubrzanje (α)	$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$	radijan u sekundi na kvadrat	rad/s^2
perioda (T)	$T = t/N = 1/f$	sekunda	s
vremenska konstanta (τ)	$F(t) = A + Be^{-t/\tau}$	sekunda	s
brojnost događaja (N)		jedan	1
frekvencija, čestota (f, ν)	$f = 1/T = N/t$ [2]	herc (hertz)	Hz ($= s^{-1}$)
frekvencija vrtnje, (brzina vrtnje, broj okretaja) (n)	$n = N/t$ [3]	herc (hertz), recipročna sekunda	Hz, 1/s
kružna frekvencija, pulzacija (ω)	$\omega = 2\pi f$	radijan u sekundi, recipročna sekunda	rad/s, 1/s
valna duljina (λ)	$\lambda = v/f$	metar	m
repetencija, valni broj (σ)	$\sigma = 1/\lambda = f/v$	recipročni metar	1/m
kružni valni broj, kružna repetencija (k)	$k = 2\pi/\lambda = 2\pi\sigma$	radijan po metru, recipročni metar	rad/m, 1/m
fazna brzina (c, v, c_φ, v_φ)	$c = \omega/k = \lambda f$	metar u sekundi	m/s
grupna brzina (c_g, v_g)	$c_g = d\omega/dk$	metar u sekundi	m/s
amplitudna razlika razina (L_F)	$L_F = \ln (F/F_0)$ [4]	neper bel	Np (= 1) B (= 1)
razlika razina snage (L_P)	$L_P = (1/2) \ln (P/P_0)$ [5]	neper bel	Np (= 1) B (= 1)
prigušnost, prigušni koeficijent (δ)	$F(t) = \exp(-\delta t) \sin \omega t$	recipročna sekunda	1/s
logaritamski dekrement (Λ)	$\lambda = T\delta = T/\tau$	neper	Np
slabljenje, koeficijent slabljenja (α)	$F(x) = Ae^{-\alpha x} \cos[\beta(x - x_0)]$	recipročni metar	1/m
fazni koeficijent (β)		recipročni metar	1/m
koeficijent rasprostiranja (γ)	$\gamma = \alpha + j\beta$	recipročni metar	1/m

[2] N je brojnost događaja, a t vrijeme.

[3] N je brojnost okretaja, a t vrijeme.

[4] F i F_0 predstavljaju dvije amplitude iste veličine, a F_0 je referentna amplituda. 1 Np je razina veličine polja kad je $\ln (F/F_0) = 1$; 1 B je razina veličine polja kad je $2 \lg (F/F_0) = 1$. Općenito: $L_F = \ln (F/F_0)$ Np $= 2 \lg (F/F_0)$ B $= 20 \lg (F/F_0)$ dB. 1 dB = (ln 10/20) Np (točno) = 0,115 129 3 Np.

[5] P i P_0 predstavljaju dvije snage, a P_0 je referentna snaga. 1 Np je razina veličine snage kad je $(1/2) \ln (P/P_0) = 1$; 1 B je razina veličine snage kad je $\lg (P/P_0) = 1$. Općenito: $L_P = (1/2) \ln (P/P_0)$ Np $= \lg (P/P_0)$ B $= 10 \lg (P/P_0)$ dB. 1 dB = (ln 10/20) Np (točno) = 0,115 129 3 Np.

Veličine i jedinice SI mehanike

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
masa (m)		kilogram	kg
reducirana masa (μ, m_r)	$m_r = m_1 m_2/(m_1 + m_2)$	kilogram	kg
gustoća, obujamna gustoća, masena gustoća (ϱ)	$\varrho = m/V$	kilogram po kubnom metru	kg/m^3
relativna gustoća (d)	$d = \varrho/\varrho_0$	jedan	1
specifični obujam, specifični volumen (v)	$v = V/m = 1/\varrho$	kubni metar po kilogramu	m^3/kg
duljinska gustoća (ili masa) (ϱ_l)	$\varrho_l = m/l$	kilogram po metru	kg/m
ploštinska gustoća (ili masa) (ϱ_A, (ϱ_S))	$\varrho_A = m/A$	kilogram po četvornom metru	kg/m^2
moment ustrajnosti, moment tromosti, moment inercije (I, J)	$I = \Sigma r^2 \Delta m$	kilogram metar na kvadrat	$kg\ m^2$
nalet, količina gibanja (p)	$\boldsymbol{p} = m \boldsymbol{v}$	kilogrammetar u sekundi	kg m/s
zamah, moment količine gibanja (L, J)	$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{p}$	kilogram metar na kvadrat u sekundi	$kg\ m^2/s$
sila (F)	$\boldsymbol{F} = m \boldsymbol{a}$	njutn (newton)	N
težina, težna sila (F_g, (G, P, W))	$\boldsymbol{F}_g = m \boldsymbol{g}$	njutn (newton)	N
impuls, impuls sile (I)	$\boldsymbol{I} = \Sigma \boldsymbol{F} \Delta t$	njutnsekunda	N s
moment sile (M)	$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}$	njutnmetar	N m
sprežni moment, moment sprega (ili para) sila (M, T)		njutnmetar	N m
impuls momenta sile	$H = \int M\, dt$	njutnmetarsekunda	N m s
gravitacijska konstanta (G, (f)) [1]	$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$	njutnmetar na kvadrat po kilogramu na kvadrat	$N\ m^2/kg^2$
tlak (p) [2]	$p = F/A$	paskal (pascal)	Pa

[1] $G = (6{,}672\ 59 \pm 0{,}000\ 85) \times 10^{-11}\ N\ m^2/kg^2$, CODATA Bulletin 63, 1986.

[2] Znak p_e se preporučuje za tlak koji se očita na instrumentu, a definiran je izrazom $p - p_{amb}$, gdje je p_{amb} okolni tlak. Očitani tlak može biti pozitivan ili negativan, zavisno od toga je li p veći ili manji od p_{amb}.

Veličine i jedinice SI mehanike *(nastavak)*

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
normalno (ili okomito) naprezanje, normalni (ili okomiti) napon (σ)	$\sigma = F_n/A$	paskal (pascal)	Pa
posmično naprezanje, (tangencijalno naprezanje) (τ)	$\tau = F_t/A$	paskal (pascal)	Pa
relativno produljenje, duljinska (ili linijska) deformacija (ε, e)	$\varepsilon = \dfrac{\Delta l}{l_0}$	jedan	1
poprečno produljenje (ε_t)	$\varepsilon_t = \dfrac{\Delta d}{d}$ [3]	jedan	1
kutna deformacija (γ)	$\gamma = \dfrac{\Delta}{d}$ [4]	jedan	1
relativna promjena obujma, obujamna deformacija (ϑ)	$\vartheta = \dfrac{\Delta V}{V_0}$	jedan	1
Poissonov omjer, Poissonov broj (μ, ν)	$\mu = -\varepsilon_t/\varepsilon$	jedan	1
rastezljivost, elastičnost (α)	$\alpha = \varepsilon/\sigma$	četvorni metar po njutnu	m^2/N
smičnost (β)	$\beta = \gamma/\tau = 1/G$	četvorni metar po njutnu	m^2/N
modul elastičnosti, Youngov modul (E)	$E = \sigma/\varepsilon$	paskal (pascal)	Pa
modul smičnosti (G)	$G = \tau/\gamma$	paskal (pascal)	Pa
modul stlačivosti (K)	$K = -p/\vartheta$	paskal (pascal)	Pa
stlačivost ($\varkappa$)	$\varkappa = -\dfrac{1}{V}\dfrac{dV}{dp}$	recipročni paskal	1/Pa
statički moment presjeka (oko osi x odnosno y) (S)	$S_x = \int y\, dA;\ S_y = -\int x\, dA$	metar na treću	m^3
moment presjeka (I_a, (I))	$I_x = \int y^2\, dA;\ I_y = \int x^2\, dA$	metar na četvrtu	m^4
polarni moment presjeka (I_p)	$I_p = \int_A r^2\, dA;\ I_p = I_x + I_y$	metar na četvrtu	m^4
moment otpora (Z, W)	$Z_x = I_x/y_{max};\ Z_y = I_y/x_{max}$	metar na treću	m^3

[3] Za pun okrugli presjek.

[4] Δx je paralelni pomak gornje površine u odnosu na donju za sloj debljine d.

Veličine i jedinice SI mehanike *(konac)*

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
polarni moment otpora (Z_p, W_p)	$Z_p = I_p/r_{max}$	metar na treću	m^3
tarnost, faktor trenja (μ, (f))	$\mu = F_f/F_n$	jedan	1
(dinamička) viskoznost (η, (μ))	$\tau_{xz} = \eta \dfrac{\Delta v_x}{\Delta z}$	paskalsekunda	Pa s
tecivost, fluidnost (φ, ϕ)	$\varphi = 1/\eta$	recipročna paskalsekunda	1/(Pa s), m^2/(N s)
kinematička viskoznost (ν)	$\nu = \eta/\varrho$	metar na kvadrat u sekundi	m^2/s
površinska napetost (γ, σ)	$\sigma = W/S$	njutn po metru	N/m
energija (E)		džul (joule)	J
rad (W, (A))	$W = \int \mathbf{F}\, d\mathbf{r}$ [5]	džul (joule)	J
potencijalna energija (E_p, V, Φ)	$E_p = -\int \mathbf{F}\, d\mathbf{r}$	džul (joule)	J
kinetička energija (E_k, T)	$E_k = \dfrac{1}{2} m v^2$	džul (joule)	J
Hamiltonova funkcija (H)	$H = E_k + E_p$	džul (joule)	J
Lagrangeova funkcija (L)	$L = E_k - E_p$	džul (joule)	J
glavna Hamiltonova funkcija (W, S_p)	$W = \int L\, dt$	džulsekunda	J s
karakteristična Hamiltonova funkcija (S)	$S = 2\int T\, dt$	džulsekunda	J s
gustoća energije (e, w)	$e = E/V$	džul po kubnom metru	J/m^3
snaga (P)	$P = \Delta E/\Delta t$	vat (watt)	W
gustoća snage (φ)	$\varphi = e/t$	vat po kubnom metru	W/m^3
maseni protok, protočna masa (q_m)	$q_m = \Delta m/\Delta t$	kilogram u sekundi	kg/s
(obujamni) protok, protočni obujam (q_V)	$q_V = \Delta V/\Delta t$	kubni metar u sekundi	m^3/s
korisnost, stupanj (korisnog) djelovanja (η)	$\eta = P_2/P_1$	jedan	1

[5] $\mathbf{F}$ je konzervativna sila.

Veličine i jedinice SI nauke o toplini

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
termodinamička temperatura (T, (Θ))		kelvin	K
Celzijeva temperatura (t, ϑ)	$t = T - T_0$ [1]	Celzijev stupanj	°C (= K)
temperaturna razlika (ΔT, Δt, $\Delta\vartheta$)	$\Delta T = T_2 - T_1$; $\Delta t = t_2 - t_1$	kelvin	K
toplinska rastezljivost, koeficijent toplinskog rastezanja (α_l)	$\alpha_l = \frac{1}{l}\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}T}$	recipročni kelvin	1/K
toplinska širivost, koeficijent toplinskog širenja (α_V, α, (γ))	$\alpha_V = \frac{1}{V}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}T}$	recipročni kelvin	1/K
napinjivost, relativni tlačni koeficijent (α_p)	$\alpha_p = \frac{1}{p}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}T}$	recipročni kelvin	1/K
tlačni koeficijent (β)	$\beta = \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}T}$	paskal po kelvinu	Pa/K
izotermna stlačivost ($\varkappa_T$)	$\varkappa_T = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T$	recipročni paskal	1/Pa
izentropna stlačivost ($\varkappa_S$)	$\varkappa_S = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_S$	recipročni paskal	1/Pa
brojnost, broj jedinki (N)		jedan	1
množina, (količina tvari) (n, ν)		mol	mol
Avogadrova konstanta (L, N_A)	$N_A = N/n$ [2]	recipročni mol	1/mol
Boltzmannova konstanta (k, k_B)	$k = R/N_A$ [3]	džul po kelvinu	J/K
molarna masa, množinska masa (M)	$M = m/n$	kilogram po molu	kg/mol
molarni obujam, množinski obujam (V_m)	$V_m = V/n$	kubni metar po molu	m³/mol
(opća) plinska konstanta (R)	$p\,V_m = R\,T$ [4]	džul po molkelvinu	J/(mol K)
plinska konstanta (tvari X) (R (X))	$R(\mathrm{X}) = R/M(\mathrm{X})$	džul po kilogramkelvinu	J/(kg K)

[1] $T_0 = 273{,}15$ K po definiciji.
[2] $N_A = (6{,}022\,136\,7 \pm 0{,}000\,003\,6) \times 10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$, CODATA Bulletin 63, 1986.
[3] $k = (1{,}380\,658 \pm 0{,}000\,012) \times 10^{-23}$ J/K, CODATA Bulletin 63, 1986.
[4] $R = (8{,}314\,510 \pm 0{,}000\,070)$ J/(mol K), CODATA Bulletin 63, 1986.

Veličine i jedinice SI nauke o toplini (*nastavak*)

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
toplina (Q)		džul (joule)	J
toplinski tok (Φ)	$\Phi = Q/t$	vat (watt)	W
gustoća toplinskog toka (q, φ)	$q = \Phi/A$	vat po četvornom metru	W/m²
toplinska provodnost, (koeficijent toplinske vodljivosti) (λ, ($\varkappa$))	$q = -\lambda\,\mathrm{grad}\,T$	vat po metarkelvinu	W/(m K)
toplinska prolaznost (prohodnost), koeficijent prolaza topline (K, (k))	$K = q/\Delta T$	vat po četvornom metru i kelvinu	W/(m² K)
toplinska prijelaznost, koeficijent prijelaza topline (h, (α))	$q = h\,(T_S - T_r)$ [5]	vat po četvornom metru i kelvinu	W/(m² K)
toplinska izolacija (M)	$M = \Delta T/q = 1/K$	četvorni metar kelvin po vatu	m² K/W
toplinska vodljivost (G)	$G = \Phi/\Delta T = 1/R$	vat po kelvinu	W/K
toplinski otpor (R)	$R = \Delta T/\Phi$	kelvin po vatu	K/W
temperaturna provodnost, temperaturna difuzivnost (a)	$a = \frac{\lambda}{\varrho\,c_p}$ [6]	četvorni metar u sekundi	m²/s
toplinski kapacitet (C)	$C = \mathrm{d}Q/\mathrm{d}T$	džul po kelvinu	J/K
toplinski kapacitet pri stalnom tlaku (C_p)	$C_p = (\partial H/\partial T)_p$	džul po kelvinu	J/K
toplinski kapacitet pri stalnom obujmu (C_V)	$C_V = (\partial H/\partial T)_V$	džul po kelvinu	J/K
specifični toplinski kapacitet (c)	$c = \frac{C}{m}$	džul po kilogramkelvinu	J/(kg K)
specifični toplinski kapacitet pri stalnom tlaku (c_p)	$c_p = \frac{C_p}{m}$	džul po kilogramkelvinu	J/(kg K)
specifični toplinski kapacitet pri stalnom obujmu (c_V)	$c_V = \frac{C_V}{m}$	džul po kilogramkelvinu	J/(kg K)
srednji specifični toplinski kapacitet ($\bar{c}$)	$\bar{c} = \frac{1}{T_2 - T_1}\int c\,(T)\,\mathrm{d}T$	džul po kilogramkelvinu	J/(kg K)
specifični toplinski kapacitet pri zasićenju (c_{sat})		džul po kilogramkelvinu	J/(kg K)

[5] T_S je temperatura površine, a T_r je referentna temperatura.
[6] λ je toplinska provodnost, ϱ gustoća, a c_p specifični toplinski kapacitet pri stalnom tlaku.

Veličine i jedinice SI nauke o toplini (*nastavak*)

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
omjer specifičnih toplinskih kapaciteta (γ)	$\gamma = c_p/c_V$	jedan	1
izentropni eksponent ($\varkappa$)	$\varkappa = -\frac{V}{p}\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_S$ [7]	jedan	1
politropni eksponent (n)	$p\,V^n = \text{const}$	jedan	1
molarni toplinski kapacitet, množinski toplinski kapacitet (C_m)	$C_m = C/n$	džul po molkelvinu	J/(mol K)
molarni toplinski kapacitet pri stalnom tlaku, množinski toplinski kapacitet pri stalnom tlaku ($C_{m,p}$)	$C_{m,p} = C_p/n$	džul po molkelvinu	J/(mol K)
molarni toplinski kapacitet pri stalnom obujmu, množinski toplinski kapacitet pri stalnom obujmu ($C_{m,V}$)	$C_{m,V} = C_V/n$	džul po molkelvinu	J/(mol K)
entropija (S)	$\Delta S = \Delta Q/\Delta T$	džul po kelvinu	J/K
specifična entropija (s)	$s = S/m$	džul po kilogramkelvinu	J/(kg K)
molarna entropija, množinska entropija (S_m)	$S_m = S/n$	džul po molkelvinu	J/(mol K)
energija (E)		džul (joule)	J
rad (W, (A))	$W = \int \boldsymbol{F}\,\mathrm{d}\boldsymbol{r}$	džul (joule)	J
unutarnja energija (U)	$\Delta U = Q + W$ [8]	džul (joule)	J
entalpija (H)	$H = U + pV$	džul (joule)	J
Helmholtzova energija, Helmholtzova funkcija (A, F)	$A = U - TS$	džul (joule)	J
Gibbsova energija, Gibbsova funkcija (G)	$G = U + pV - TS = H - TS$	džul (joule)	J
specifična energija (e)	$e = E/m$	džul po kilogramu	J/kg
specifična unutarnja energija (u)	$u = U/m$	džul po kilogramu	J/kg
specifična entalpija (h)	$h = H/m$	džul po kilogramu	J/kg
specifična Helmholtzova energija (a, f)	$a = A/m$	džul po kilogramu	J/kg

[7] Za idealni je plin $\varkappa = c_p/c_V = \gamma$.

[8] Q je dovedena toplina, a W rad što ga je sustav obavio.

Veličine i jedinice SI nauke o toplini (*konac*)

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
specifična Gibbsova energija (g)	$g = G/m$	džul po kilogramu	J/kg
molarna unutarnja energija, množinska unutarnja energija (U_m)	$U_m = U/n$	džul po molu	J/mol
molarna entalpija, množinska entalpija (H_m)	$H_m = H/n$	džul po molu	J/mol
molarna Helmholtzova energija, množinska Helmholtzova energija (A_m, F_m)	$A_m = A/n$	džul po molu	J/mol
molarna Gibbsova energija, množinska Gibbsova energija (G_m)	$G_m = G/n$	džul po molu	J/mol
Massieuova funkcija (J)	$J = -A/T$	džul po kelvinu	J/K
Planckova funkcija (Y)	$Y = -G/T$	džul po kelvinu	J/K
masena koncentracija vlage, apsolutna vlažnost (Φ, a)	$\Phi = m_v/V$	kilogram po kubnom metru	kg/m³
specifična vlažnost, udjel vlage (s, q)	$s = m_v/m$	jedan	1
sadržaj vlage, (stupanj vlažnosti, vlažnost) (u, x)	$u = m_v/m_0$	jedan	1
suhoća, (atro) (A)	$A = m_0/m$	jedan	1
relativna koncentracija vlage, (relativna vlažnost) (φ)	$\varphi = \Phi/\Phi_{max}$	jedan	1
obujamni sadržaj vlage, (obujamna vlažnost) (Ψ)	$\Psi = V_v/V_0$	jedan	1

Veličine i jedinice SI elektromagnetizma

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
električna struja (I)		amper	A
električni naboj, elektrika (Q)	$Q = \int I\,\mathrm{d}t$	kulon (coulomb)	C
elementarni naboj (e) [1]		kulon (coulomb)	C
(obujamna) nabojna gustoća (ϱ, (η))	$\varrho = Q/V$	kulon po kubnom metru	C/m³

[1] $e = (1{,}602\,177\,33 \pm 0{,}000\,000\,49) \times 10^{-19}$ C, CODATA Bulletin 63, 1986.

Veličine i jedinice SI elektromagnetizma (*nastavak*)

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
ploštinska nabojna gustoća (σ)	$\sigma = Q/A$	kulon po četvornom metru	C/m²
duljinska nabojna gustoća (λ)	$\lambda = \Delta Q/\Delta l$	kulon po metru	C/m
električno polje, jakost električnog polja (E)	$\boldsymbol{F} = Q\,\boldsymbol{E}$	volt po metru	V/m
električni potencijal (V, φ)	$\boldsymbol{E} = -\,\mathbf{grad}\,V$	volt	V
električni napon, razlika potencijala (U, (V))	$U = \varphi_1 - \varphi_2$	volt	V
elektromotorna sila, elektromotorni napon (E)	$E = -\oint \boldsymbol{E}\,\mathrm{d}\boldsymbol{l}$	volt	V
gustoća električnog toka, električna indukcija (D)	$\mathrm{div}\,\boldsymbol{D} = \varrho$	kulon po četvornom metru	C/m²
električni tok (Ψ)	$\Psi = \int \boldsymbol{D} \times \boldsymbol{e}_n\,\mathrm{d}A$	kulon (coulomb)	C
električni kapacitet, električna kapacitivnost (C)	$C = Q/U$	farad	F
električna propusnost, permitivnost, dielektričnost (ε)	$\boldsymbol{D} = \varepsilon\,\boldsymbol{E}$	farad po metru	F/m
električna propusnost praznine, permitivnost praznine (vakuuma), električna konstanta (ε_0)	$\varepsilon_0 = \mu_0^{-1} c_0^{-1}$ [2]	farad po metru	F/m
relativna (električna) propusnost, relativna permitivnost (ε_r)	$\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$	jedan	1
električna primljivost, električna susceptibilnost (χ, χ_e)	$\chi = \varepsilon_r - 1$	jedan	1
električni dipolni moment (p, p_e)	$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{p} \times \boldsymbol{E}$	kulonmetar	C m
električna polarizacija (P)	$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{D} - \varepsilon_0\,\boldsymbol{E}$	kulon po četvornom metru	C/m²
gustoća električne struje, (električna) strujna gustoća (J, (S))	$I = \Sigma\,\boldsymbol{J} \times \boldsymbol{e}_n\,\Delta A$	amper po četvornom metru	A/m²
strujni oblog (A, (α))	$A = I/b$ [3]	amper po metru	A/m

[2] $\varepsilon_0 = 8{,}854\ 187\ 817 \ldots \times 10^{-12}$ F/m.

[3] b je širina vodljivog sloja.

Veličine i jedinice SI elektromagnetizma (*nastavak*)

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
magnetno polje, jakost magnetnog polja (H)	$\mathrm{rot}\,\boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \partial\boldsymbol{D}/\partial t$	amper po metru	A/m
magnetni napon, razlika magnetnog potencijala (U_m, (U))	$U_m = \Sigma\,\boldsymbol{H}\,\Delta\,\boldsymbol{l}$	amper	A
magnetomotorni napon (F, F_m)	$F = \oint \boldsymbol{H}\,\mathrm{d}\boldsymbol{r}$	amper	A
strujna uzbuda (Θ) [4]		amper	A
gustoća magnetnog toka, magnetna indukcija (B)	$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{I}\,\Delta\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B}$	tesla	T
magnetni tok (Φ)	$\Phi = \int \boldsymbol{B} \times \boldsymbol{e}_n\,\mathrm{d}\boldsymbol{A}$	veber (weber)	Wb
(magnetni) vektorski potencijal (A)	$\boldsymbol{B} = \mathrm{rot}\,\boldsymbol{A}$	veber po metru	Wb/m
samoinduktivnost, vlastita induktivnost (L)	$L = \Phi/I$	henri (henry)	H
međuinduktivnost (M, L_{mn})	$M = \Phi_1/I_2$	henri (henry)	H
sveza, faktor sveze (k, ($\varkappa$))	$k = \lvert L_{mn} \rvert/\sqrt{L_m L_n}$	jedan	1
rasap, faktor raspršenja (σ)	$\sigma = 1 - k^2$	jedan	1
magnetna propusnost, permeabilnost (apsolutna) (μ)	$\boldsymbol{B} = \mu\,\boldsymbol{H}$	henri po metru	H/m
magnetna propusnost praznine, permeabilnost praznine (vakuuma), magnetna konstanta (μ_0) [5]		henri po metru	H/m
relativna magnetna propusnost, relativna permeabilnost (μ_r)	$\mu_r = \mu/\mu_0$	jedan	1
magnetna primljivost, magnetna susceptibilnost ($\varkappa$, (χ_m))	$\varkappa = \mu_r - 1$	jedan	1
magnetni moment, elektromagnetni moment (m)	$\boldsymbol{m} \times \boldsymbol{B} = \boldsymbol{T}$	amper četvorni metar	A m²
magnetizacija (M, (H_i))	$\boldsymbol{M} = (\boldsymbol{B}/\mu_0) - \boldsymbol{H}$	amper po metru	A/m
magnetna polarizacija (J, (B_i))	$\boldsymbol{J} = \boldsymbol{B} - \mu_0\,\boldsymbol{H}$	tesla	T
gustoća elektromagnetne energije, obujamna magnetna energija (w)	$w = W/V$ [6]	džul po kubnom metru	J/m³

[4] Kada Θ rezultira od N jednakih električnih struja I, tada je $\Theta = N\,I$.

[5] $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m (točno) $= 1{,}256\ 637\ 061\ 4 \ldots \times 10^{-6}$ H/m.

[6] W je energija.

Veličine i jedinice SI elektromagnetizma (*nastavak*)

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
Poyntingov vektor (S)	$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}$	vat po četvornom metru	W/m^2
fazna brzina elektromagnetnih valova (c)		metar u sekundi	m/s
fazna brzina elektromagnetnih valova u praznini (vakuumu) (c, c_0)	$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ [7]	metar u sekundi	m/s
(električni) otpor (R)	$R = U/I$	om (ohm)	Ω
(električna) vodljivost (G)	$G = 1/R$	simens (siemens)	S
(trenutna) snaga (P)	$P = U I$	vat (watt)	W
(električna) otpornost (ϱ)	$\boldsymbol{E} = \varrho \boldsymbol{J}$	ommetar	Ω m
(električna) provodnost (γ, σ, $\varkappa$)	$\gamma = 1/\varrho$	simens po metru	S/m
magnetni otpor, reluktancija (R, R_m)	$R_m = U_m/\Phi$	recipročni henri	1/H
magnetna vodljivost, permeancija (Λ, (P))	$L = 1/R_m$	henri (henry)	H
broj zavoja u namotu (N)		jedan	1
broj faza (m)		jedan	1
broj polnih parova (p)		jedan	1
frekvencija, čestota (f, ν)	$f = N/t$ [8]	herc (hertz)	Hz ($= s^{-1}$)
frekvencija vrtnje, (brzina vrtnje, broj okretaja) (n)	$n = N/t$ [9]	recipročna sekunda	1/s
kružna frekvencija, pulsacija (ω)	$\omega = 2 \pi f$	radijan u sekundi, recipročna sekunda	rad/s, 1/s
fazni pomak (φ, ϕ)		radijan, jedan	rad, 1
impedancija, prividni otpor (Z)	$Z = \lvert Z \rvert e^{j\varphi} = R + jX$	om (ohm)	Ω

[7] c_0 = 299 792 458 m/s (točno).

[8] N je broj promjena, a t vrijeme.

[9] N je broj okretaja, a t vrijeme.

Veličine i jedinice SI elektromagnetizma (*konac*)

Veličina (i njezin znak)	Definicija veličine	Jedinica SI	
		Naziv	Znak
modul impedancije, (impedancija) ($\lvert Z \rvert$)	$\lvert Z \rvert = \sqrt{R^2 + X^2}$	om (ohm)	Ω
otpor, rezistancija (R) [10]		om (ohm)	Ω
reaktancija, jalovi otpor (X) [11]	$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$	om (ohm)	Ω
admitancija, prividna vodljivost (Y)	$Y = 1/Z$	simens (siemens)	S
modul admitancije, (admitancija) ($\lvert Y \rvert$)	$\lvert Y \rvert = \sqrt{G^2 + B^2}$	simens (siemens)	S
vodljivost, konduktancija (G) [12]		simens (siemens)	S
susceptancija, jalova vodljivost (B) [13]		simens (siemens)	S
dobrota (Q) [14]		jedan	1
faktor gubitka (d)	$d = 1/Q$	jedan	1
kut gubitka (δ)	$\delta = \arctan d$	radijan	rad
djelatna snaga (P)	$P = \frac{1}{T}\int_0^T ui \, dt$ [15]	vat (watt)	W
prividna snaga (S, (P_S)) [16]	$S = U I$	voltamper	VA (= W)
jalova snaga (Q, P_Q) [16]	$Q^2 = S^2 - P^2$	voltamper (var)	var (= W)
faktor snage (λ) [16]	$\lambda = P/S$	jedan	1
djelatna energija (W, (W_P))	$W = \int ui \, dt$	džul (joule)	J

[10] Realni dio impedancije.

[11] Imaginarni dio impedancije.

[12] Realni dio admitancije.

[13] Imaginarni dio admitancije.

[14] Za sustave koji ne zrače, ako je $Z = R + jX$, tada je $Q = \lvert X \rvert / R$.

[15] $p = ui$ trenutačna snaga.

[16] Kada je $u = \hat{u} \cos \omega t = \sqrt{2} U \cos \omega t$ i $i = \hat{i} \cos(\omega t - \varphi) = \sqrt{2} I \cos(\omega t - \varphi)$, tada je $P = U I \cos \varphi$, $Q = U I \sin \varphi$ i $\lambda = \cos \varphi$.

NEKE ZAKONITE MJERNE JEDINICE I JEDINICE SI

Geometrijske veličine

1. *Duljina l, L*

Jedinica SI duljine je metar (znak: m).

Druge jedinice:

nanometar	1 nm	$= 10^{-9}$ m	$= 10^{-6}$ mm
mikrometar	1 µm	$= 10^{-6}$ m	$= 10^{-3}$ mm
milimetar	1 mm	$= 10^{-3}$ m	
centimetar	1 cm	$= 10^{-2}$	= 10 mm
decimetar	1 dm	$= 10^{-1}$ m	= 10 cm
kilometar	1 km	$= 10^{3}$ m	
morska milja [1]		= 1 852 m.	

2. *Ploština, površina A, S*

Jedinica SI ploštine je četvorni metar (znak: m^2).

Druge jedinice:

četvorni milimetar	1 mm^2	$= 10^{-6}$ m^2
četvorni centimetar	1 cm^2	$= 10^{-4}$ m^2
četvorni decimetar	1 dm^2	$= 10^{-2}$ m^2
ar	1 a	$= 10^{2}$ m^2
hektar	1 ha	$= 10^{4}$ m^2 = 100 a
četvorni kilometar	1 km^2	$= 10^{6}$ m^2 = 100 ha.

3. *Obujam, volumen V*

Jedinica SI obujma je kubni metar (znak: m^3).

Druge jedinice:

kubni milimetar	1 mm^3	$= 10^{-9}$ m^3		
kubni centimetar	1 cm^3	$= 10^{-6}$ m^3		
kubni decimetar	1 dm^3	$= 10^{-3}$ m^3		
litra [2]	1 l (1 L)	$= 10^{-3}$ m^3	= 1 dm^3	
mikrolitra	1 µl (1 µL)	$= 10^{-9}$ m^3	$= 10^{-6}$ l	(10^{-6} L)
mililitra	1 ml (1 mL)	$= 10^{-6}$ m^3	$= 10^{-3}$ l	(10^{-3} L)
centilitra	1 cl (1 cL)	$= 10^{-5}$ m^3	$= 10^{-2}$ l	(10^{-2} L)
decilitra	1 dl (1 dL)	$= 10^{-4}$ m^3	$= 10^{-1}$ l	(10^{-1} L)
hektolitra	1 hl (1 hL)	$= 10^{-1}$ m^3	$= 10^{2}$ l	(10^{2} L).

[1] Definiciju vidi na str. 65.
[2] Definiciju vidi na str. 65.

4. *Kut, (ravninski kut) α, β, γ, ...*

Jedinica SI ravninskog kuta je radijan (znak: rad).

Druge jedinice:

puni kut	1 puni kut $= 360° = 400^g = 2\,\pi$ rad
pravi kut	$1∟ = 90 = 100^g = \frac{\pi}{2}$ rad = 1,570 796 rad
kutni stupanj	$1° =$ puni kut/360 $= \frac{∟}{90} = \frac{\pi}{180}$ rad = 0,017 453 3 rad
kutna minuta	$1' = \left(\frac{1}{60}\right)^{\circ} = \frac{\pi}{10\,800}$ rad
kutna sekunda	$1'' = \left(\frac{1}{60}\right)' = \left(\frac{1}{3\,600}\right)^{\circ} = \frac{\pi}{648\,000}$ rad
gon, grad	$1\text{ gon} = 1^g = \frac{\text{puni kut}}{400} = \frac{\pi}{200}$ rad = 0,015 707 96 rad.

1 rad = puni kut /2 π = 360°/2 π = 57,295 78° = 57° 17′ 44,8″.

5. *Ugao, (prostorni kut) Ω*

Jedinica SI prostornog kuta je steradijan (znak: sr).

$$\text{steradijan} = \text{sr} = [\Omega]_{SI} = \left(\frac{A}{r^2}\right)_{A=r^2} = 1,$$

tj. pri $A = r^2$ je $\Omega = 1$, indeks SI uz uglatu zagradu znači da je riječ o jedinici SI.

Vremenske veličine

1. *Vrijeme t*

Jedinica SI vremena je sekunda (znak: s).

Druge jedinice:

milisekunda	1 ms	$= 10^{-3}$ s	
kilosekunda	1 ks	$= 10^{3}$ s	
minuta	1 min	= 60 s	
sat (hora)	1 h	= 60 min	= 3 600 s
dan (dies)	1 d	= 24 h	= 86 400 s
godina (annus) [1]	1 a	= 8760 h	= 31 536 ks.

[1] S obzirom na prijestupne godine vrijedi u prosjeku: 1 a = 8 765,76 h = 31 556,736 ks.

2. *Brzina u, w, c* [1]

Jedinica SI brzine je metar u sekundi (znak: m/s).

Druge jedinice:

metar u minuti	1 m/min	= 1/60 m/s
kilometar u sekundi	1 km/s	= 10^3 m/s
kilometar na sat	1 km/h	= 1/3,6 m/s
čvor (milja na sat), knot	1 čvor	= 1,852 km/h = 0,514 4 m/s.

3. *Ubrzanje a* [2]

Jedinica SI ubrzanja je metar u sekundi na kvadrat (znak: m/s^2).

4. *Frekvencija f, ν*

Jedinica SI frekvencije je herc (hertz) (znak: Hz = s^{-1}).

Druge jedinice:

kiloherc	1 kHz	= 10^3 Hz
megaherc	1 Mhz	= 10^6 Hz
gigaherc	1 Ghz	= 10^9 Hz.

5. *Kružna frekvencija, pulsacija ω*

Jedinica SI kružne frekvencije je recipročna sekunda (znak: s^{-1}).

6. *Frekvencija vrtnje, brzina vrtnje, broj okretaja n*

Jedinica SI frekvencije vrtnje je herc (hertz) (znak: Hz, s^{-1}).

Druga jedinica:

okretaj u minuti 1 okr./min = (1/60) s^{-1}.

7. *Kutna brzina, kutna frekvencija ω*

Jedinica SI kutne brzine je radijan u sekundi (znak: rad/s).

8. *Kutno ubrzanje α*

Jedinica SI kutnog ubrzanja je radijan u sekundi na kvadrat (znak: rad/s^2).

---

[1] Brzina svjetlosti u vakuumu c_0 = 299 792 458 m/s (točno).

[2] Normalno težno ubrzanje g_n = 9,806 65 m/s^2 (točno).

Masene veličine

1. *Masa m*

Jedinica SI mase je kilogram (znak: kg).

Druge jedinice:

miligram	1 mg	= 10^{-6} kg = 10^{-3} g
centigram	1 cg	= 10^{-5} kg = 10^{-2} g
decigram	1 dg	= 10^{-4} kg = 10^{-1} g
gram	1 g	= 10^{-3} kg
dekagram	1 dag	= 10^{-2} kg = 10 g
megagram	1 Mg	= 10^3 kg = 1 t
tona	1 t	= 10^3 kg = 1 Mg
kilotona	1 kt	= 10^6 kg = 10^3 t
megatona	1 Mt	= 10^9 kg = 10^6 t
jedinstvena atomna masena jedinica [1]	1 u	= 1,660 540 · 10^{-27} kg.

2. *Duljinska gustoća ϱ_l*

Jedinica SI duljinske gustoće je kilogram po metru (znak: kg/m).

Druge jedinice:

kilogram po kilometru	1 kg/km	= 10^{-3} kg/m
teks, tex [2]	1 teks	= 10^{-6} kg/m = 1 g/km.

3. *Ploštinska gustoća ϱ_A*

Jedinica SI ploštinske gustoće je kilogram po četvornom metru (znak: kg/m^2).

4. *Gustoća, obujamna gustoća, masena gustoća ϱ*

Jedinica SI gustoće jest kilogram po kubnom metru (znak: ϱ).

Druge jedinice:

gram po kubnom decimetru	1 g/dm^3	= 1 kg/m^3
gram po kubnom centimetru	1 g/cm^3	= 10^3 kg/m^3.
kilogram po kubnom decimetru	1 kg/dm^3	
megagram po kubnom metru	1 Mg/m^3	
tona po kubnom metru	1 t/m^3	

5. *Specifični obujam v*

Jedinica SI specifičnog obujma je kubni metar po kilogramu (znak: m^3/kg).

Druga jedinica:

kubni decimetar po kilogramu 1 dm^3/kg = 10^{-3} m^3/kg.

---

[1] Definiciju vidi na str. 65.

[2] Definiciju vidi na str. 66.

6. *Moment ustrajnosti, moment tromosti, moment inercije J*

Jedinica SI momenta tromosti je kilogram metar na kvadrat (znak: kg m²).

Druge jedinice:

gram metar na kvadrat	$1\ g\ m^2 = 10^{-3}\ kg\ m^2$
kilogram milimetar na kvadrat	$1\ kg\ mm^2 = 10^{-6}\ kg\ m^2$.

Protočne veličine

1. *Maseni protok* q_m

Jedinica SI masenog protoka je kilogram u sekundi (znak: kg/s).

Druge jedinice:

gram u sekundi	1 g/s	$= 10^{-3}$ kg/s
gram u minuti	1 g/min	$= 10^{-3}/60$ kg/s
gram na sat	1 g/h	$= 10^{-3}/3\ 600$ kg/s
kilogram u minuti	1 kg/min	= 1/60 kg/s
kilogram na sat	1 kg/h	= 1/3 600 kg/s
tona u sekundi	1 t/s	$= 10^3$ kg/s
tona u minuti	1 t/min	$= 10^3/60$ kg/s
tona na sat	1 t/h	$= 10^3/3\ 600$ kg/s.

2. *Obujamni protok* q_V

Jedinica SI obujamnog protoka je kubni metar u sekundi (znak: m³/s).

Druge jedinice:

kubni metar u minuti	$1\ m^3/min$	$= 1/60\ m^3/s$
kubni metar na sat	$1\ m^3/h$	$= 1/3\ 600\ m^3/s$
litra u sekundi	1 l/s	$= 10^{-3}\ m^3/s$
litra u minuti	1 l/min	$= 10^{-3}/60\ m^3/s$
litra na sat	1 l/h	$= 10^{-3}/3\ 600\ m^3/s$.

Veličine sile

1. *Sila F* [1)]

Jedinica SI sile je njutn (newton) (znak: N).

Druge jedinice:

mikronjutn	1 µN	$= 10^{-6}$ N
milinjutn	1 mN	$= 10^{-3}$ N
kilonjutn	1 kN	$= 10^3$ N
meganjutn	1 MN	$= 10^6$ N.

[1)] Definiciju vidi na str. 67 i 68.

2. *Moment sile M, sprežni moment T*

Jedinica SI momenta sile je njutnmetar (znak: N m).

Druge jedinice:

milinjutnmetar	$1\ mN\ m = 10^{-3}\ N\ m$
njutnmilimetar	$1\ N\ mm = 10^{-3}\ N\ m$
kilonjutnmetar	$1\ kN\ m = 10^3\ N\ m$
meganjutnmetar	$1\ MN\ m = 10^6\ N\ m$.

3. *Tlak p* [1)], *naprezanje* σ, τ

Jedinica SI tlaka i naprezanja je paskal (pascal) (znak: Pa = N/m²).

Druge jedinice:

milipaskal	1 mPa	$= 10^{-3}$ Pa
kilopaskal	1 kPa	$= 10^3$ Pa = kN/m²
megapaskal	1 MPa	$= 10^6$ Pa = MN/m² = N/mm²
gigapaskal	1 GPa	= kN/mm²
bar	1 bar	$= 10^5$ Pa
milibar	1 mbar	$= 10^2$ Pa = hPa
mikrobar	1 µbar	$= 10^{-1}$ Pa
normalna atmosfera	1 atm	= 1 013,25 mbar.

4. *Nalet, količina gibanja p*

Jedinica SI naleta je kilogrammetar u sekundi (znak: kg m/s)

Druge jedinice:

grammetar u sekundi	$1\ g\ m/s = 10^{-3}\ kg\ m/s$
megagrammetar u sekundi	$1\ Mg\ m/s = 10^3\ kg\ m/s$.

5. *Dinamička viskoznost* η

Jedinica SI dinamičke viskoznosti je paskalsekunda (znak: Pa s).

Druga jedinica:

milipaskalsekunda $1\ mPa\ s = 10^{-3}\ Pa\ s$.

6. *Kinematička viskoznost* ν

Jedinica SI kinematičke viskoznosti je metar na kvadrat u sekundi (znak: m²/s).

Druga jedinica:

milimetar na kvadrat u sekundi $1\ mm^2/s = 10^{-6}\ m^2/s$.

[1)] Znak p_e se preporučuje za tlak koji se očita na instrumentu, a definiran je izrazom $p_e = p - p_{amb}$, gdje je p_{amb} okolni tlak. Očitani tlak može biti pozitivan ili negativan, zavisno od toga je li p veći ili manji od p_{amb}.

$p > p_{amb}$	$p_e > 0$	predtlak
$p < p_{amb}$	$p_e < 0$	podtlak

Energetske veličine

1. *Energija E, rad W, toplina Q*

Jedinica SI energije je džul (joule) (znak: J = N m).

Druge jedinice:

kilodžul	1 kJ	= 10^3 J
megadžul	1 MJ	= 1 10^6 J
gigadžul	1 GJ	= 1 10^9 J
vatsekunda	1 W s	= 1 J
vatsat	1 W h	= 3 600 J
kilovatsekunda	1 kW s	= 1 kJ
kilovatsat	1 kW h	= 3 600 kJ
megavatsat	1 MW h	= 3 600 MJ
elektronvolt	1 eV	= 1,602 177 · 10^{-19} J.

2. *Snaga P, toplinski tok Φ*

Jedinica SI snage je vat (watt) (znak: W = J/s).

Druge jedinice:

milivat	1 mW	= 10^{-3} W
kilovat	1 kW	= 10^3 W
megavat	1 MW	= 10^6 W
gigavat	1 GW	= 10^9 W
kilodžul u sekundi	1 kJ/s	= 1 kW
kilodžul na sat	1 kJ/h	= 1/3 600 kW.

Toplinske veličine

1. *Temperatura T* [1]

Jedinica SI termodinamičke temperature je kelvin (znak: K).

Druga jedinica:

Celzijev stupanj	°C	= K.

2. *Toplinska rastezljivost, koeficijent toplinskog rastezanja* α_l

Jedinica SI toplinske rastezljivosti je recipročni kelvin (znak: K^{-1}).

Druga jedinica:

recipročni megakelvin	1 MK^{-1}	= 10^{-6} K^{-1}.

[1] Definiciju termodinamičke i Celzijeve temperature vidi na str. 59 i 97.

3. *Brzina zagrijavanja i hlađenja T/t (dT/dt)*

Jedinica SI brzine zagrijavanja i hlađenja je kelvin u sekundi (znak: K/s).

Druge jedinice:

kelvin u minuti	1 K/min	= 1/60 K/s
kelvin na sat	1 K/h	= 1/3 600 K/s.

4. *Specifični toplinski kapacitet c*

Jedinica SI specifičnog toplinskog kapaciteta je džul po kilogramkelvinu (znak: J/(kg K)).

Druga jedinica:

kilodžul po kilogramkelvinu	1 kJ/(kg K)	= 10^3 J/(kg K).

5. *Entalpija H*

Jedinica SI entalpije je džul (znak: J).

Druga jedinica:

kilodžul	1 kJ	= 10^3 J.

6. *Specifična entalpija h*

Jedinica SI specifične entalpije je džul po kilogramu (znak: J/kg).

Druga jedinica:

kilodžul po kilogramu	1 kJ/kg	= 10^3 J/kg.

7. *Entropija S*

Jedinica SI entropije je džul po kelvinu (znak: J/K).

Druga jedinica:

kilodžul po kelvinu	1 kJ/K	= 10^3 J/K.

8. *Specifična entropija s*

Jedinica SI specifične entropije je džul po kilogramkelvinu (znak: J/(kg K)).

Druga jedinica:

kilodžul po kilogramkelvinu	1 kJ/(kg K)	= 10^3 J/(kg K).

9. *Ogrjevna vrijednost, gornja* H_s *i donja* H_i

Jedinica SI ogrjevne vrijednosti je džul po kilogramu (znak: J/kg).

Druge jedinice:

kilodžul po kilogramu	1 kJ/kg	= 10^3 J/kg
megadžul po kilogramu	1 MJ/kg	= 10^6 J/kg.

10. *Toplinska provodnost λ*

Jedinica SI toplinske provodnosti je vat po metarkelvinu (znak: W/(m K)).

Druga jedinica:

kilovat po metarkelvinu	1 kW/(m K)	= 10^3 W/(m K).

11. *Toplinska prijelaznost h, toplinska prolaznost K*

Jedinica SI toplinske prijelaznosti je vat po četvornom metru i kelvinu (znak: W/(m² K)).

Druga jedinica:

kilovat po četvornom metru i kelvinu	1 kW/(m² K)	= 10^3 W/(m² K).

Molarne veličine

1. *Molarna masa M*

Jedinica SI molarne mase je kilogram po molu (znak: kg/mol).

Druge jedinice:

gram po molu	1 g/mol	= 10^{-3} kg/mol
kilogram po kilomolu	1 kg/kmol	= 10^{-3} kg/mol.

2. *Molarni obujam V_m*

Jedinica SI molarnog obujma je kubni metar po molu (znak: m³/mol).

Druga jedinica:

kubni metar po kilomolu	1 m³/kmol	= 10^{-3} m³/mol.

3. *Množinska koncentracija sastojka B* c_B

Jedinica SI množinske koncentracije je mol po kubnom metru (znak: mol/m³).

Druga jedinica:

kilomol po kubnom metru	1 kmol/m³	= 10^3 mol/m³.

4. *Molarni toplinski kapacitet C_m*

Jedinica SI molarnog toplinskog kapaciteta je džul po molkelvinu (znak: J/(mol K)).

Druge jedinice:

džul po kilomolkelvinu	1 J/(kmol K)	= 10^{-3} J/(mol K)
kilodžul po kilomolkelvinu	1 kJ/(kmol K)	= 1 J/(mol K)
kilodžul po molkelvinu	1 kJ/(mol K)	= 10^3 J/(mol K).

5. *Molarna entalpija H_m*

Jedinica SI molarne entalpije je džul po molu (znak: J/mol).

Druge jedinice:

džul po kilomolu	1 J/kmol	= 10^{-3} J/mol
kilodžul po kilomolu	1 kJ/kmol	= 1 J/mol
kilodžul po molu	1 kJ/mol	= 10^3 J/mol.

6. *Molarna entropija S_m*

Jedinica SI molarne entropije je džul po molkelvinu (znak: J/(mol K)).

Druge jedinice:

džul po kilomolkelvinu	1 J/(kmol K)	= 10^{-3} J/(mol K)
kilodžul po kilomolkelvinu	1 kJ/(kmol K)	= 1 J/(mol K)
kilodžul po molkelvinu	1 kJ/(mol K)	= 10^3 J/(mol K).

Veličine zračenja

1. *Aktivnost A*

Jedinica SI aktivnosti je bekerel (becquerel) (znak: Bq = s^{-1}).

2. *Apsorbirana doza D*

Jedinica SI apsorbirane doze je grej (gray) (znak: Gy = J/kg).

3. *Dozni ekvivalent H*

Jedinica SI doznog ekvivalenta je sivert (sievert) (znak: Sv = J/kg).

4. *Ekspozicija X*

Jedinica SI ekspozicije je kulon po kilogramu (znak: C/kg).

Električne veličine

1. *Električna struja I*

Jedinica SI električne struje je amper (znak: A).

Druge jedinice:

nanoamper	1 nA	= 10^{-9} A
mikroamper	1 µA	= 10^{-6} A
miliamper	1 mA	= 10^{-3} A
kiloamper	1 kA	= 10^3 A.

2. *Električni naboj, elektrika Q*

Jedinica SI električnog naboja je kulon (coulomb) (znak: C = A s).

Druge jedinice:

milikulon	1 mC	= 10^{-3} C
kilokulon	1 kC	= 10^3 C
ampersekunda	1 A s	= 1 C
ampersat	1 A h	= 3 600 C.

3. *Električni napon U*

Jedinica SI električnog napona je volt (znak: V = W/A).

Druge jedinice:

mikrovolt	1 μV	$= 10^{-6}$ V
milivolt	1 mV	$= 10^{-3}$ V
kilovolt	1 kV	$= 10^{3}$ V
megavolt	1 MV	$= 10^{6}$ V.

4. *Jakost električnog polja E*

Jedinica SI jakosti električnog polja je volt po metru (znak: V/m = N/C).

Druge jedinice:

milivolt po metru	1 mV/m	$= 10^{-3}$ V/m
kilovolt po metru	1 kV/m	$= 10^{3}$ V/m
volt po milimetru	1 V/mm	$= 10^{3}$ V/m.

5. *Električni otpor R*

Jedinica SI električnog otpora je om (ohm) (znak: Ω = V/A).

Druge jedinice:

miliom	1 mΩ	$= 10^{-3}$ Ω
kiloom	1kΩ	$= 10^{3}$ Ω.

6. *Električna otpornost ϱ*

Jedinica SI električne otpornosti je ommetar (znak: Ω m).

Druga jedinica:

om četvorni milimetar po metru	1 Ω mm^2/m	$= 10^{-6}$ Ω m.

7. *Električna vodljivost G*

Jedinica SI električne vodljivosti je simens (siemens) (znak: $S = \Omega^{-1}$).

8. *Električni kapacitet C*

Jedinica SI električnog kapaciteta je farad (znak: F = C/V).

Druge jedinice:

pikofarad	1 pF	$= 10^{-12}$ F
nanofarad	1 nF	$= 10^{-9}$ F
mikrofarad	1 μF	$= 10^{-6}$ F
milifarad	1 mF	$= 10^{-3}$ F.

9. *Induktivnost L*

Jedinica SI induktivnosti je henri (henry) (znak: H = V s/A).

Druge jedinice:

pikohenri	1 pH	$= 10^{-12}$ H
nanohenri	1 nH	$= 10^{-9}$ H
mikrohenri	1 μH	$= 10^{-6}$ H
milihenri	1 mH	$= 10^{-3}$ H.

10. *Magnetna indukcija B*

Jedinica SI magnetne indukcije je tesla (znak: T = N/(A m)).

Druge jedinice:

nanotesla	1 nT	$= 10^{-9}$ T
mikrotesla	1 μT	$= 10^{-6}$ T
militesla	1 mT	$= 10^{-3}$ T.

11. *Magnetni tok Φ*

Jedinica SI magnetnog toka je veber (weber) (znak: Wb = T m^2).

Druga jedinica:

miliveber	1 mWb	$= 10^{-3}$ Wb.

12. *Magnetno polje H*

Jedinica SI magnetnog polja je amper po metru (znak: A/m).

Druge jedinice:

miliamper po metru	1 mA/m	$= 10^{-3}$ A/m
kiloamper po metru	1 kA/m	$= 10^{3}$ A/m
amper po milimetru	1 A/mm	$= 10^{3}$ A/m.

Svjetlosne veličine

1. *Jakost zračenja I, (I_e)*

Jedinica SI jakosti zračenja je vat po steradijanu (znak: W/sr).

2. *Svjetlosna jakost I, (I_v)*

Jedinica SI svjetlosne jakosti je kandela (candela) (znak: cd).

3. *Svjetljivost, luminancija L, (L_v)*

Jedinica SI luminancije je kandela po četvornom metru (znak: cd/m^2).

4. *Svjetlosni tok Φ, (Φ_v)*

Jedinica SI svjetlosnog toka je lumen (znak: lm = cd sr).

5. *Osvjetljenje, iluminancija E, (E_v)*

Jedinica SI iluminancije je luks (lux) (znak: lx = lm/m^2).

Odnosi između nekih starijih jedinica, različitih sustava i jedinica SI

1. *Za duljinu (l, L)*

ongstrem, (ångström)	1 Å	= 0,1 nm	= 10^{-10} m
inch, col, palac	1 in (″)	= 25,4 mm	= 0,025 4 m
foot, stopa	1 ft (′)	= 12 in	= 0,304 8 m
jard (yard)	1 yd	= 3 ft	= 0,914 4 m
fathom, fadom	1 fm	= 2 yd	= 1,828 8 m.

2. *Za ploštinu (A, S)*

barn	1 b	= 100 fm^2	= 10^{-28} m^2
square inch [1]	1 in^2	= 6,451 6 cm^2	= 645,16 · 10^{-6} m^2
square foot [1]	1 ft^2	= 9,290 3 dm^2	= 92,903 · 10^{-3} m^2
square yard [1]	1 yd^2		= 0,836 13 m^2.

3. *Za obujam (V)*

cubic inch [2]	1 in^3	= 16,387 cm^3	= 16,387 · 10^{-6} m^3
cubic foot [2]	1 ft^3	= 28,32 dm^3	= 28,32 · 10^{-3} m^3
cubic yard [2]	1 yd^3		= 0,764 55 m^3
registarska tona	1 R.T.	= 100 ft^3	= 2,832 m^3.

4. *Za brzinu (v, c, u, w)*

foot per minute	1 ft/min	= 0,005 08 m/s
foot per second	1 ft/s	= 0,304 8 m/s
yard per second	1 yd/s	= 0,914 4 m/s.

5. *Za ubrzanje (a)*

gal	1 Gal	= 1 cm/s^2	= 0,01 m/s^2
foot per second squared	1 ft/s^2		= 0,304 8 m/s^2
yard per second squared	1 yd/s^2		= 0,914 4 m/s^2.

6. *Za masu (m)*

kvintal, metrička centa	1 q	= 100 kg
hyl	1 hyl	= 9,806 65 kg
funta, pound (libre)	1 lb	= 0,453 59 kg
Long ton (US) [3]		= 2 240 lb = 1 016, 05 kg
karat (metrički)	1 k	= 0,2 g = 200 mg = 2 10^{-4} kg.

1) Rabe se i kratice: sq in, sq ft i sq yd.
2) Rabe se i kratice: cu in, cu ft i cu yd.
3) Long ton (US) = UK ton.

7. *Za gustoću (ϱ)*

pound per cubic inch	1 lb/in^3	= 27 680 kg/m^3
pound per cubic foot	1 lb/ft^3	= 16,017 kg/m^3
pound per cubic yard	1 lb/yd^3	= 0,593 28 kg/m^3.

8. *Za silu (F)*

milipond	1 mp	= 10^{-3} p	= 9,806 65 · 10^{-6} N
pond	1 p	= 10^{-3} kp	= 9,806 65 · 10^{-3} N
kilopond [1]	1 kp		= 9,806 65 N
megapond	1 Mp	= 10^3 kp	= 9,806 65 · 10^3 N
din	1 dyn	= 10 μN	= 10^{-5} N
sthène	1 st		= 10^3 N
poundal	1 pdl		= 0,138 254 N.

9. *Za tlak (p) i naprezanje (σ)*

normalna atmosfera	1 atm	= 760 mmHg	= 101 325 Pa
tehnička atmosfera	1 at	= 1 kp/cm^2	= 98 066,5 Pa
milimetar živina stupca	1 mmHg		= 133,323 Pa
milimetar vodenog stupca	1 mmH_2O	= 1 kg/m^2	= 9,806 65 Pa
kilopond			
– po četvornom metru	1 kp/m^2	= 1 mmH_2O	= 9,806 65 Pa
– po četvornom centimetru	1 kp/cm^2	= 1 at	= 98 066,5 Pa
– po četvornom milimetru	1 kp/mm^2		= 9 806 650 Pa
barye	1 barye	= 0,1 N/m^2	= 10^{-1} Pa
pièze	1 pz	= 1 kN/m^2	= 10^3 Pa
hectopièze	1 hpz	= 1 bar	= 10^5 Pa
inch of mercury	1 inHg		= 3 386 Pa
inch of water	1 inH_2O		= 249,1 Pa
pound-force per square inch	1 lbf/in^2		= 6 895 Pa
pound-force per square foot	1 lbf/ft^2		= 47,88 Pa
pound-force per square yard	1 lbf/yd^2		= 5,320 Pa
long ton per square inch	1 long ton/in^2		= 15 444 151 Pa
long ton per square foot	1 long ton/ft^2		= 107 251 Pa.

10. *Za dinamičku viskoznost (η)*

centipoaz	1 cP	= 10^{-3} Pa s
poaz (poise)	1 P	= 10^{-1} Pa s
dekapoaz	1 daP	= 1 Pa s.

1) Definiciju vidi na str. 68.

11. *Za kinematičku viskoznost (ν)*

centistoks	1 cSt	= 1 mm^2/s	= 10^{-6} m^2/s
stoks (stokes)	1 St	= 1 cm^2/s	= 10^{-4} m^2/s.

Stupnjevi po Engleru °E:

°E	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0
mm^2/s	1,00	1,82	2,82	3,92	5,08	6,25	7,41	9,66	11,8
°E	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
mm^2/s	16,7	21,1	29,5	37,4	45,2	52,9	60,8	68,4	76,0

Iznad 10 °E = 76 mm^2/s treba za svaki 1 °E dodati 7,6 mm^2/s.

12. *Za energiju, rad, toplinu (E, W, Q)*

kilopondmetar	1 kp m	= 9,806 65 J
konjska snaga-sat	1 KS h	= 2,648 10^6 J
kalorija	1 cal	= 4,186 8 J
kilokalorija	1 kcal	= 4 186,8 J
megakalorija	1 Mcal	= 1,163 kW h
litra-atmosfera	1 l at	= 98,066 5 J
erg	1 erg	= 10^{-7} J
foot pound-force	1 ft lbf	= 1,355 8 J
horsepower hour	1 hp h	= 2,685 · 10^6 J
British thermal unit	1 Btu	= 1,055 056 · 10^3 J.

13. *Za snagu, toplinski tok (P, Φ)*

kilopondmetar u sekundi	1 kp m/s	= 9,806 65 W
konjska snaga	1 KS	= 735,499 W
kalorija u sekundi	1 cal/s	= 4,186 8 W
kilokalorija na sat	1 kcal/h	= 1,163 W
erg u sekundi	1 erg/s	= 10^{-7} W
foot pound-force per second	1 ft lbf/s	= 1,355 8 W
horsepower	1 hp	= 745,7 W
British thermal unit per hour	1 Btu/h	= 0,293 071 W.

14. *Za električne veličine*

magnetna indukcija B	gauss	1 Gs	= 10^{-4} T
magnetni tok Φ	maxwell	1 Mx	= 10^{-8} Wb
magnetno polje H	oersted	1 Oe	= $10^3/4\pi$ A/m.

15. *Za svjetlosne veličine*

jakost svjetla I_v	Hefnerova svijeća	1 HS	= 0,917 cd
	Međunarodna svijeća	1 MS	= 1,02 cd
luminancija L	stilb	1 sb	= 10^4 cd/m^2
	nit	1 nt	= 1 cd/m^2
iluminancija E	phot	1 ph	= 10^4 lx.

16. *Za veličine zračenja*

aktivnost A	curie	1 Ci	= 3,7 · 10^{10} Bq
apsorbirana doza D	rad	1 rad	= 0,01 Gy
dozni ekvivalent H	rem	1 rem	= 0,01 Sv
ekspozicija X	röntgen	1 R	= 2,58 · 10^{-4} C/kg.

17. *Odnosi među jedinicama temperature*

Termodinamička temperatura (T, Θ) iskazuje se jedinicom kelvin (znak: K), koja je definirana jednadžbom:

$$K = \frac{T_t}{273,16},$$

gdje je T_t temperatura vode (H_2O) u trojnom stanju. U engleskom se jezičnom području termodinamička temperatura (T), kadšto iskazuje i jedinicom *Rankinov stupanj* (znak: °R). Odnos je kelvina (K) i Rankinova stupnja (°R):

$$K = \frac{9}{5}\,°R = 1,8\,°R, \qquad \text{odnosno:} \qquad °R = \frac{5}{9}\,K.$$

Osim termodinamičke temeprature rabi se i Celzijeva temperatura (t, ϑ), koja se iskazuje jedinicom *Celzijev stupanj* (znak: °C). Celzijeva temperatura i pripadna temperaturna ljestvica definirane su jednadžbom:

$$t = T - T_0,$$

gdje je konstanta T_0 = 273,15 K po definiciji.

Jedinica Celzijev stupanj (°C) jednaka je jedinici kelvin (K):

Celzijev stupanj = kelvin,

°C = K .

Prema tome, jedinica Celzijev stupanj (°C) samo je poseban naziv za jedinicu kelvin (K) kad se iskazuje Celzijeva temperatura.

Jedinica termodinamičke temperature kelvin (K) i jedinica Celzijeve temperature Celzijev stupanj (°C) rabe se i za iskazivanje temperaturnog raspona ili razlike:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = t_2 - t_1 = \Delta t.$$

Na primjer: $\Delta t = t_2 - t_1$ = 60 °C – 40 °C = 20 °C = 20 K.

Osim Celzijeve temperature (t), u engleskom se jezičnom području kadšto rabi i Fahrenheitova temperataura (t_F, ϑ_F), koja se iskazuje jedinicom *Fahrenheitov stupanj* (znak: °F).

Fahrenheitova temperatura i njezina temperaturna ljestvica definirane su jednadžbom:

$$t_F = T - T_{0R},$$

gdje je T_{0R} = 459,67 °R.

Jedinica Fahrenheitov stupanj (°F) jednaka je jedinici Rankinov stupanj (°R):

$$\text{Fahrenheitov stupanj} = \text{Rankinov stupanj},$$
$$^\circ\mathrm{F} = {}^\circ\mathrm{R}.$$

Obje se te temperature, Celzijeva (t) i Fahrenheitova (t_F), oslanjaju na termodinamičku temperaturu (T) i od nje se razlikuju samo za stalnu vrijednost.

Pomoću navedenih definicijskih jednadžbi dobiva se nekoliko karakterističnih točaka vode predočenih u sljedećoj tablici.

Neke karakteristične temperaturne točke vode

apsolutna ništica	$T = 0$ K	$t = -273,15$ °C	$t_F = -459,67$ °F	$T = 0$ °R
ledište vode	$T_0 = 273,15$ K	$t_0 = 0$ °C	$t_{F,0} = 32$ °F	$T_0 = 491,67$ °R
trojna točka vode	$T_t = 273,16$ K	$t_t = 0,01$ °C	$t_{F,t} = 32,018$ °F	$T_t = 491,688$ °R
vrelište vode	$T_v = 373,15$ K	$t_v = 100$ °C	$t_{F,v} = 212$ °F	$T_v = 671,67$ °R

Odnosi među nekim temperaturnim jedinicama:

$$\mathrm{K} = {}^\circ\mathrm{C},\ \ \mathrm{K} = \frac{9}{5}\,{}^\circ\mathrm{R} = 1{,}8\,{}^\circ\mathrm{R},\ \ {}^\circ\mathrm{R} = \frac{5}{9}\,\mathrm{K},\ \ {}^\circ\mathrm{R} = {}^\circ\mathrm{F},\ \ {}^\circ\mathrm{C} = 1{,}8\,{}^\circ\mathrm{F}\ \text{ i }\ {}^\circ\mathrm{F} = \frac{5}{9}\,\mathrm{K}.$$

Veza između Celzijeve temperature (t) i Farenheitove temperature (t_F), koje se razlikuju po konstantama T_0 i T_{0R}, dobiva se pomoću veličinskih jednadžbi:

$$t = T - T_0, \qquad T_0 = 273{,}15\ \mathrm{K},$$
$$t_F = T - T_{0R}, \qquad T_{0R} = 459{,}67\ {}^\circ\mathrm{R}.$$

Eliminacijom veličine T iz definicijskih jednadžbi dobiva se izraz:

$$t = t_F + T_{0R} - T_0.$$

Razlika je konstanata T_{0R} i T_0:

$$T_{0R} - T_0 = 459{,}67\ {}^\circ\mathrm{R} - 273{,}15\ \mathrm{K}.$$

Budući da je K = 1,8 °R, to se uvrštenjem te vrijednosti u gornju jednadžbu dobiva:

$$T_{0R} - T_0 = 459{,}67\ {}^\circ\mathrm{R} - 273{,}15 \times 1{,}8\ {}^\circ\mathrm{R} = 459{,}67\ {}^\circ\mathrm{R} - 491{,}67\ {}^\circ\mathrm{R} = -32\ {}^\circ\mathrm{R},$$

odnosno:

$$T_{0R} - T_0 = -32\ {}^\circ\mathrm{F},$$

jer je °R = °F.

Prema tome veza veličinâ t i t_F glasi:

$$t = t_F - 32\ {}^\circ\mathrm{F}, \qquad \text{odnosno:} \qquad t_F = t + 32\ {}^\circ\mathrm{F}.$$

Primjer. Treba temperaturu tališta bakra t = 1 083 °C iskazati u Fahrenheitovim stupnjevima (°F). Prema gornjoj jednadžbi Fahrenheitova je temperatura:

$$t_F = t + 32\ {}^\circ\mathrm{F} = 1\,083\ {}^\circ\mathrm{C} + 32\ {}^\circ\mathrm{F} = 1\,083 \times 1{,}8\ {}^\circ\mathrm{F} + 32\ {}^\circ\mathrm{F}$$
$$= 1\,949{,}4\ {}^\circ\mathrm{F} + 32\ {}^\circ\mathrm{F} = 1\,981{,}4\ {}^\circ\mathrm{F}.$$

Isti se primjer može riješiti i pomoću brojčane jednadžbe. Prema izrazu u 2. retku i 4. stupcu niže predočene tablice dobiva se brojčana vrijednost:

$$\{t_F\}_{^\circ F} = \frac{9}{5}\{t\}_{^\circ C} + 32 = \frac{9}{5}\cdot 1\,083 + 32 = 1\,949{,}4 + 32 = 1\,981{,}4.$$

Budući da je brojčana vrijednost definirana općom jednadžbom $\{t_F\} = t/[t_F]$, slijedi da je temperatura tališta bakra u Fahrenheitovim stupnjevima (°F):

$$t_F = \{t_F\}\,[t_F] = 1981{,}4\ {}^\circ\mathrm{F},$$

jer je $\{t_F\}$ = 1 981,4, a $[t_F]$ = °F.

Brojčane jednadžbe* koje povezuju različite temperaturne ljestvice

	1.	2.	3.	4.	5.
	K	°C	°Ré	°F	°R
1.	$\{T\}_K = \{t\}_{^\circ C} + 273{,}15$	$\{t\}_{^\circ C} = \{T\}_K - 273{,}15$	$\{t_R\}_{^\circ Ré} = \frac{4}{5}[\{T\}_K - 273{,}15]$	$\{t_F\}_{^\circ F} = \frac{9}{5}\{T\}_K - 459{,}67$	$\{T_R\}_{^\circ R} = \frac{9}{5}\{T\}_K$
2.	$\{T\}_K = \frac{5}{4}\{t_R\}_{^\circ Ré} + 273{,}15$	$\{t\}_{^\circ C} = \frac{5}{4}\{t_R\}_{^\circ Ré}$	$\{t_R\}_{^\circ Ré} = \frac{4}{5}\{t\}_{^\circ C}$	$\{t_F\}_{^\circ F} = \frac{9}{5}\{t\}_{^\circ C} + 32$	$\{T_R\}_{^\circ R} = \frac{9}{5}\{t\}_{^\circ C} + 491{,}67$
3.	$\{T\}_K = \frac{5}{9}[\{t_F\}_{^\circ F} + 459{,}67]$	$\{t\}_{^\circ C} = \frac{5}{9}[\{t_F\}_{^\circ F} - 32]$	$\{t_R\}_{^\circ Ré} = \frac{4}{9}[\{t_F\}_{^\circ F} - 32]$	$\{t_F\}_{^\circ F} = \frac{9}{4}\{t_R\}_{^\circ Ré} + 32$	$\{T_R\}_{^\circ R} = \frac{9}{4}\{t_R\}_{^\circ Ré} + 491{,}67$
4.	$\{T\}_K = \frac{5}{9}\{T_R\}_{^\circ R}$	$\{t\}_{^\circ C} = \frac{5}{9}[\{T_R\}_{^\circ R} - 491{,}67]$	$\{t_R\}_{^\circ Ré} = \frac{4}{9}[\{T_R\}_{^\circ R} - 491{,}67]$	$\{t_F\}_{^\circ F} = \{T_R\}_{^\circ R} - 459{,}67$	$\{T_R\}_{^\circ R} = \{t_F\}_{^\circ F} + 459{,}67$

* Brojčane jednadžbe povezuju brojčane vrijednosti $\{T\}_K$, $\{t\}_{^\circ C}$, $\{t_R\}_{^\circ Ré}$, $\{t_F\}_{^\circ F}$ i $\{T_R\}_{^\circ R}$ veličinâ T, t, t_R, t_F i T_R izražene jedinicama K, °C, °Ré, °F i °R, tj.:

$$\{T\}_K = \frac{T}{\mathrm{K}}, \quad \{t\}_{^\circ C} = \frac{t}{^\circ\mathrm{C}}, \quad \{t_R\}_{^\circ Ré} = \frac{t_R}{^\circ\mathrm{Ré}}, \quad \{t_F\}_{^\circ F} = \frac{t_F}{^\circ\mathrm{F}} \quad \text{i} \quad \{T_R\}_{^\circ R} = \frac{T_R}{^\circ\mathrm{R}},$$

gdje su: T termodinamička, t Celzijeva, t_R Réaumurova, t_F Fahrenheitova i T_R termodinamička temperataura, a K jedinica kelvin, °C Celzijev stupanj, °Ré Réaumurov stupanj, °F Fahrenheitov stupanj i °R Rankinov stupanj.

Réaumurova temperatura (t_R) (koju spominjemo iz povijesnih razloga) iskazuje se jedinicom Réaumurov stupanj (znak: °Ré), a njezina se temperaturna ljestvica temelji na dvije čvrste točke, i to na ledištu vode, koje je označeno s t_0 = 0 °Ré (0 °Ré ≙ 0 °C), i vrelištu vode, koje je označeno s t_v = 80 °Ré (80 °Ré ≙ 100 °C). Dakle, temperaturni razmak između ledišta i vrelišta vode razdijeljen je na 80 jednakih dijelova, što znači da je:

$$80\ {}^\circ\mathrm{Ré} = 100\ {}^\circ\mathrm{C}, \qquad \text{odnosno:} \qquad {}^\circ\mathrm{Ré} = \frac{100\ {}^\circ\mathrm{C}}{80} = 1{,}25\ {}^\circ\mathrm{C}.$$

Prema tome je:

Réaumurov stupanj = 1,25 Celzijevih stupnjeva = 1,25 kelvina, tj.:

°Ré = 1,25 °C = 1,25 K, odnosno: °C = K = 0,8 °Ré.

»Bauméova areometarska ljestvica« služi za određivanje gustoće kapljevina pomoću stupnjeva Bauméa (°Bé).

a) Za kapljevine gustoće $\varrho \geq 1\ \mathrm{kg/dm^3}$ određena je Bauméova ljestvica vrijednostima N:

$$N = 0\ °\mathrm{Bé}\ \text{pri}\ \varrho = 1{,}0\ \mathrm{kg/dm^3}$$
$$N = 66\ °\mathrm{Bé}\ \text{pri}\ \varrho = 1{,}842\ 7\ \mathrm{kg/dm^3}.$$

Zas preračunavanje vrijedi

$$\varrho = 144{,}32/(144{,}32 - N), \qquad [\varrho] = \mathrm{kg/dm^3}.$$

b) Za kapljevine gustoće $\varrho \leq 1\ \mathrm{kg/dm^3}$ određena je Bauméova ljestvica vrijednosti N:

$$N = 10\ °\mathrm{Bé}\ \text{pri}\ \varrho = 1{,}0\ \mathrm{kg/dm^3}$$
$$N = 90\ °\mathrm{Bé}\ \text{pri}\ \varrho = 0{,}643\ 4\ \mathrm{kg/dm^3}.$$

Za preračunavanje vrijedi:

$$\varrho = 144{,}32/(134{,}32 + N), \qquad [\varrho] = \mathrm{kg/dm^3}.$$

Beaufortova ljestvica jakosti vjetra

Skup brojčanih oznaka od 0 do 12 i odgovarajućih raspona vrijednosti brzina vjetra naziva se Beaufortova ljestvica, a jedinica bofor (beaufort, Bf). Približnu vezu između jakosti vjetra u boforima (Bf) i odgovarajuće brzine vjetra v u metrima u sekundi (m/s) daje izraz: $v = 0{,}836\sqrt{\mathrm{Bf}^3}$.

Beaufortova ljestvica jakosti vjetra u ovisnosti o brzini vjetra

Bf	Srednja brzina v		Opis vjetra	Bf	Srednja brzina v		Opis vjetra
	čvor (knot)	m/s			čvor (knot)	m/s	
0	1	0 ... 0,2	tišina	7	28 ... 33	13,9 ... 17,1	vrlo jak vjetar
1	1 ... 3	0,3 ... 1,5	lahor	8	34 ... 40	17,2 ... 30,7	olujni vjetar
2	4 ... 6	1,6 ... 3,3	povjetarac	9	41 ... 47	20,8 ... 24,4	oluja
3	7 ... 10	3,4 ... 5,4	slab vjetar	10	48 ... 55	24,5 ... 28,4	žestoka oluja
4	11 ... 16	5,5 ... 7,9	umjeren vjetar	11	56 ... 63	28,5 ... 32,6	orkanska oluja
5	17 ... 21	8,0 ... 10,7	umjereno jak v.	12	63 ... 71	32,7 ... 36,9	orkan
6	22 ... 27	10,8 ... 13,8	jak vjetar				

$$1\ \text{čvor (knot)} = \frac{1\ \text{morska milja}}{\text{sat}} = \left(\frac{1\ \text{international nautic mile}}{\text{hour}} = \frac{1\ \text{n mile}}{\text{h}}\right)$$
$$= 1{,}852\ \mathrm{km/h} = 1\ 852\ \mathrm{m/h} = 0{,}514\ 444\ 44\ \mathrm{m/s}$$

1 stopa (foot) = 0,304 8 metara (točno).

Potresi

a) Ljestvica po G. Mercalliju (1902; novija, Medvedev-Sponheuer-Karnikova ljestvica, tzv. MSK-78) razdijeljena je na 12 stupnjeva intenziteta.

Ljestvica potresa

Stupanj	Učinak potresa	Ubrzanje tla $\dfrac{a}{\mathrm{m\,s^{-2}}}$
I.	Neprimjetljiv potres; bilježe ga samo seizmografi.	
II.	Vrlo slab potres; osjete ga samo neke osobe koje miruju.	
III.	Slab potres; osjeti ga više osoba.	
IV.	Umjeren potres; osjeti ga većina osoba u kući, a izvan kuće samo neki; trepere prozori i posude.	
V.	Prilično jak potres; osjeti ga većina ljudi, obješeni se predmeti njišu i pomiču se slike na zidu.	0,12 ... 0,25
VI.	Jak potres; osjećaju ga svi, a mnogi bježe iz kuće, na pojedinim zgradama puca žbuka.	0,25 ... 0,50
VII.	Vrlo jak potres; manja oštećenja na slabije građenim zgradama, ruše se dimnjaci.	0,50 ... 1,0
VIII.	Razoran potres; velike pukotine na zidovima, ruše se krovni zabati.	1,0 ... 2,0
IX.	Pustošeći potres; ruše se starije kuće, klizi tlo.	2,0 ... 4,0
X.	Uništavajući potres; teška oštećenja zgrada, ruši se većina zgrada od opeke, na branama i nasipima nastaju teška oštećenja, a u tlu pukotine široke do 1 m.	4,0 ... 8,00
XI.	Katastrofalan potres; ruše se sve zidane zgrade, nastaju teška razaranja i na vrlo solidnim zgradama, mostovima, prugama i cestama, a u tlu nastaju široke pukotine.	
XII.	Potpuna katastrofa; razaraju se sve ljudske tvorevine, nastaju pukotine s velikim vertikalnim i horizontalnim pomacima tla, koje potpuno mijenja svoj izgled.	

b) Ljestvica po C. F. Richteru (1935) iskazuje se magnitudom:

$$MS = \lg(A/T) + 1{,}66 \lg D + 3,$$

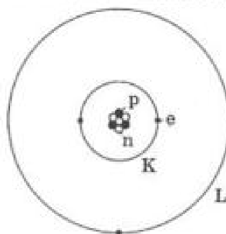
gdje su:

A najveća amplituda pomaka čestica (µm),
T perioda (s),
D geocentrična udaljenost žarišta (°). (Najveća je izmjerena magnituda $MS = 8{,}7$.)

TVARI

SASTAV TVARI

Tvari (materija) se sastoje od kemijskih *elemenata* (počela) ili njihovih *spojeva*. Svi se spojevi mogu rastaviti na elemente koji se dalje ne mogu rastavljati nikakvim kemijskim sredstvima.



p = *protoni*, n = *neutroni*, e = *elektroni*

Najmanja čestica ili jedinka kemijskog elementa, koja se dalje ne može rastaviti nikakvim kemijskim postupkom, naziva se *atom*. (Promjer atoma iznosi po redu veličine približno 0,1 nm = 10^{-10} m.)

Nuklearna je fizika svojim otkrićima razvila (Bohrov) model o građi atoma, prema kojem se atom svakoga elementa sastoji od jezgre, gdje su sabrani *nukleoni*, tj. pozitivno nabijeni *protoni* i električki neutralni *neutroni*, te negativno nabijenih *elektrona* koji okružuju jezgru.

U jezgri atoma (promjera reda veličine ≈ 10^{-14} m) skupljena je gotovo sva masa atoma.

Mase i naboji nukleona i elektrona:

	masa	naboj
proton	$1{,}672 \cdot 10^{-24}$ g	$+\,0{,}160 \cdot 10^{-18}$ As
neutron	$1{,}675 \cdot 10^{-24}$ g	0
elektron	$0{,}9108 \cdot 10^{-27}$ g	$-\,0{,}160 \cdot 10^{-18}$ As

Naboj jezgre određen je brojem protona i jednak je »protonskom ili atomnom broju *Z*« elementa. Tim su nabojem određena kemijska i fizikalna svojstva elementa.

Ukupan broj nukleona, tj. protona i neutrona, daje »nukleonski ili maseni broj *A*« koji je jednak zaokruženoj relativnoj atomnoj masi elementa.

Npr. uranov atom ($Z = 92$) relativne atomne mase $A_r = 238{,}029$ sastoji se od 92 protona i 146 neutrona, pa mu je nukleonski ili maseni broj $A = 238$.

U električki neutralnih atoma broj elektrona jednak je broju protona, tj. protonskom broju *Z* (= rednom broju *Z*).

Elektroni kruže oko atomne jezgre, razmješteni u glavne energetske razine, odnosno ljuske ili ovojnice, koje se obilježavaju slovima sljedećim redom: K, L, M, N, O, P i Q ili brojevima 1, 2, 3, ... *n*. Broj elektrona u svakoj ljusci je ograničen ($2n^2$):

ljuska	K	L	M	N	O	P	Q
najveći broj elektrona	2	8	18	32	(50)	(72)	(98)

Elektronima su sasvim popunjene samo ljuske K, L, M i N.

Kemijski elementi

Element				Raspored elektrona po ljuskama						
Naziv	Znak	*Z* [1]	A_r [2]	K	L	M	N	O	P	Q
vodik	H	1	1,008	1						
helij	He	2	4,003	2						
litij	Li	3	6,939	2	1					
berilij	Be	4	9,012	2	2					
bor	B	5	10,81	2	3					
ugljik	C	6	12,01	2	4					
dušik	N	7	14,01	2	5					
kisik	O	8	16,00	2	6					
fluor	F	9	19,00	2	7					
neon	Ne	10	20,18	2	8					
natrij	Na	11	22,99	2	8	1				
magnezij	Mg	12	24,31	2	8	2				
aluminij	Al	13	26,98	2	8	3				
silicij	Si	14	28,09	2	8	4				
fosfor	P	15	30,97	2	8	5				
sumpor	S	16	32,06	2	8	6				
klor	Cl	17	35,45	2	8	7				
argon	Ar	18	39,95	2	8	8				
kalij	K	19	39,10	2	8	8	1			
kalcij	Ca	20	40,08	2	8	8	2			
skandij	Sc	21	44,96	2	8	9	2			
titan	Ti	22	47,90	2	8	10	2			
vanadij	V	23	50,94	2	8	11	2			
krom	Cr	24	52,00	2	8	13	1			
mangan	Mn	25	54,94	2	8	13	2			
željezo	Fe	26	55,85	2	8	14	2			
kobalt	Co	27	58,93	2	8	15	2			
nikal	Ni	28	58,71	2	8	16	2			
bakar	Cu	29	63,54	2	8	18	1			
cink	Zn	30	65,37	2	8	18	2			
galij	Ga	31	69,72	2	8	18	3			
germanij	Ge	32	72,59	2	8	18	4			
arsen	As	33	74,92	2	8	18	5			
selen	Se	34	78,96	2	8	18	6			
brom	Br	35	79,91	2	8	18	7			
kripton	Kr	36	83,80	2	8	18	8			
rubidij	Rb	37	85,47	2	8	18	8	1		
stroncij	Sr	38	87,62	2	8	18	8	2		
itrij	Y	39	88,91	2	8	18	9	2		
cirkonij	Zr	40	91,22	2	8	18	10	2		
niobij	Nb	41	92,91	2	8	18	12	1		
molibden	Mo	42	95,94	2	8	18	13	1		
tehnecij	Tc	43	(99)	2	8	18	14	1		
rutenij	Ru	44	101,1	2	8	18	15	1		
rodij	Rh	45	102,9	2	8	18	16	1		

[1] *Z* protonski ili atomni broj (broj protona u atomnoj jezgri).

[2] A_r je relativna atomna masa, a *A* je nukleonski ili maseni broj.

Kemijski elementi (*konac*)

Element				Raspored elektrona po ljuskama						
Naziv	Znak	Z [1]	A_r [2]	K	L	M	N	O	P	Q
paladij	Pd	46	106,4	2	8	18	18	0		
srebro	Ag	47	107,9	2	8	18	18	1		
kadmij	Cd	48	112,4	2	8	18	18	2		
indij	In	49	114,8	2	8	18	18	3		
kositar	Sn	50	118,7	2	8	18	18	4		
antimon	Sb	51	121,8	2	8	18	18	5		
telur	Te	52	127,6	2	8	18	18	6		
jod	J	53	126,9	2	8	18	18	7		
ksenon	Xe	54	131,3	2	8	18	18	8		
cezij	Cs	55	132,9	2	8	18	18	8	1	
barij	Ba	56	137,3	2	8	18	18	8	2	
lantan	La	57	138,9	2	8	18	18	9	2	
cerij	Ce	58	140,1	2	8	18	20	8	2	
praseodimij	Pr	59	140,9	2	8	18	21	8	2	
neodimij	Nd	60	144,2	2	8	18	22	8	2	
prometij	Pm	61	(145)	2	8	18	23	8	2	
samarij	Sm	62	150,4	2	8	18	24	8	2	
europij	Eu	63	152,0	2	8	18	25	8	2	
gadolinij	Gd	64	157,3	2	8	18	25	9	2	
terbij	Tb	65	158,9	2	8	18	27	8	2	
disprozij	Dy	66	162,5	2	8	18	28	8	2	
holmij	Ho	67	164,9	2	8	18	29	8	2	
erbij	Er	68	167,3	2	8	18	30	8	2	
tulij	Tm	69	168,9	2	8	18	31	8	2	
iterbij	Yb	70	173,0	2	8	18	32	8	2	
lutecij	Lu	71	175,0	2	8	18	32	9	2	
hafnij	Hf	72	178,5	2	8	18	32	10	2	
tantal	Ta	73	180,9	2	8	18	32	11	2	
volfram	W	74	183,9	2	8	18	32	12	2	
renij	Re	75	186,2	2	8	18	32	13	2	
osmij	Os	76	190,2	2	8	18	32	14	2	
iridij	Ir	77	192,2	2	8	18	32	15	2	
platina	Pt	78	195,1	2	8	18	32	16	2	
zlato	Au	79	197,0	2	8	18	32	18	1	
živa	Hg	80	200,6	2	8	18	32	18	2	
talij	Tl	81	204,4	2	8	18	32	18	3	
olovo	Pb	82	207,2	2	8	18	32	18	4	
bizmut	Bi	83	209,0	2	8	18	32	18	5	
polonij	Po	84	(210)	2	8	18	32	18	6	
astat	At	85	(210)	2	8	18	32	18	7	
radon	Rn	86	(222)	2	8	18	32	18	8	
francij	Fr	87	(223)	2	8	18	32	18	8	1
radij	Ra	88	(226)	2	8	18	32	18	8	2
aktinij	Ac	89	(227)	2	8	18	32	18	9	2
torij	Th	90	232,0	2	8	18	32	18	10	2
protaktinij	Pa	91	(231)	2	8	18	32	20	9	2
uran	U	92	238,0	2	8	18	32	21	9	2

Transurani su umjetno dobiveni (radioaktivni) elementi, kojih u prirodi nema:

Element	Znak	Z	A_r = [1]
neptunij	Np	93	(237)
plutonij	Pu	94	(242)
americij	Am	95	(243)
kirij (curij)	Cm	96	(247)
berkelij	Bk	97	(247)
kalifornij	Cf	98	(249)
ajnštajnij	Es	99	(254)
fermij	Fm	100	(253)
mendelevij	Md	101	(256)
nobelij	No	102	(253)
lavrencij	Lw	103	(257)
kurčatovij	Ku	104	(261)
hanij (borij)	Ha (Bo)	105	(262)

Pri istom atomnom broju Z (tj. pri jednakom broju protona) mogući su različiti maseni brojevi atomne mase A (zbog različita broja neutrona). Elementi s istim atomnim brojem Z (s jednakim nabojem jezgre), ali s različitim masenim brojem, A, pa stoga i različitim relativnim atomnim masama, nazivaju se *izotopima*. Izotopi se vladaju kemijski potpuno jednako; razlikuju se samo fizikalnim svojstvima.

Za vodik npr. poznata su tri izotopa: vodik H = ^1H (s protonom i bez neutrona), deuterij D = ^2H (s protonom i jednim neutronom) i tricij T = ^3H (s protonom i dva neutrona).

Prirodni se elementi sastoje većinom od stalne mješavine svojih izotopa. (Samo se 22 prirodna elementa sastoje samo od po jednoga izotopa, npr. F, Na, Al, P, Co itd.) Npr.: prirodni uran sadrži 99,280 % izotopa ^{238}U, 0,714 % izotopa ^{235}U i 0,006 % izotopa ^{234}U.

*

Pri jednakom pozitivnom naboju jezgre (tj. pri jednakom broju protona) broj elektrona može biti veći ili manji. Takav atom, koji više nije električki neutralan, naziva se *ion*.

Pozitivni ioni (*kationi*) nastaju od atoma koji mogu otpuštati elektrone, tj. od takvih, koji imaju u vanjskoj ljusci po jedan ili dva elektrona (kod elemenata s većim brojem protona i više). To su prave kovine (dobro vode električnu struju). Većina su kemijskih elemenata kovine.

Negativni ioni (*anioni*) nastaju od atoma koji mogu primati elektrone, tj. od takvih koji imaju u vanjskoj ljusci sedam ili šest elektrona (pri elemenata s malim brojem protona i manje). To su prave nekovine (ne vode električnu struju).

---

[1] Podatci se iz raznih izvora znatno razlikuju, a vrijede za najstabilniji izotop.

Među elementima koji tvore samo katione ili anione, postoje i elementi koji u određenim okolnostima tvore jedne ili druge ione. (Elementi s četiri elektrona u vanjskoj ljusci samo kadšto tvore ione.)

Periodni sustav elemenata (po Mendeljejevu)

Brojevi iznad kemijskog znaka su atomni brojevi Z.
Znak +: elementi (kovine) koji tvore samo pozitivne ione (katione).
Znak –: elementi (nekovine) koji tvore samo negativne ione (anione).

Perioda	Glavna skupina (glavni elementi) I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.
1.	1 H							2 He
2.	3 + Li	4 Be	5 – B	6 – C	7 – N	8 – O	9 – F	10 Ne
3.	11 + Na	12 + Mg	13 Al	14 – Si	15 – P	16 – S	17 – Cl	18 Ar
4.	19 + K	20 + Ca	31 Ga	32 Ge	33 As	34 – Se	35 – Br	36 Kr
5.	37 + Rb	38 + Sr	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 – J	54 Xe
6.	55 + Cs	56 + Ba	81 Tl	82 Pb	83 + Bi	84 Po	85 – At	86 Rn
7.	87 + Fr	88 + Ra						

Lijevo i pod debelom crtom su kovine, a desno i iznad debele crte su nekovine.

Perioda	Sporedna skupina (prijelazni elementi) 1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.		
4.	29 + Cu	30 Zn	21 + Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 + Ni
5.	47 + Ag	48 + Cd	39 + Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 + Rh	46 + Pd
6.	79 + Au	80 + Hg	57 + La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 + Ir	78 + Pt
7.			89 + Ac	104 Ku	105 Ha					

Z = 58 ... 71 – lantanidi⁺, Z = 90 ... 103 – aktinidi (uranidi)⁺.
U sporednoj skupini su svi elementi samo kovine.

Svojstva elemenata

Element Skupina	Znak	Promjer atoma $\frac{d}{\text{nm}}$	Valencija [1]	Talište $\frac{t_t}{°\text{C}}$	Vrelište $\frac{t_v}{°\text{C}}$	Gustoća (20 °C) $\frac{\varrho}{\text{kg/m}^3}$
	H	0,169	1	– 259,4	– 252,7	0,084
Alkalijske kovine						
I.	Li	0,313	1	186	1 370	530
	Na	0,383	1	97,7	892	970
	K	0,476	1	63	770	860
	Rb	0,502	1	39	680	1 530
	Cs	0,540	1	28	690	1 900
Zemnoalkalijske kovine						
II.	Be	0,225	2	1 280	2 770	1 820
	Mg	0,320	2	650	1 110	1 740
	Ca	0,393	2	850	1 440	1 550
	Sr	0,429	2	770	1 380	2 600
	Ba	0,448	2	704	1 640	3 500
Borna skupina						
III.	B		3	2 300	2 550	2 300
	Al	0,282	3	660,1	2 060	2 699
	Ga	0,270	3	29,8	2 071	5 910
	In	0,314	3	156,4	1 450	7 310
	Tl	0,342	1, 3	300	1 460	11 850
Ugljična skupina						
IV.	C	0,154	4, 2	3 700	4 820	2 220
	Si	0,234	4	1 430	2 300	2 330
	Ge	0,279	4	958	2 700	5 360
	Sn	0,316	4, 2	231,9	2 270	7 298
	Pb	0,349	2, 4	327,3	1 740	11 340
Dušična skupina						
V	N	0,106	3, 5, 2	– 210,0	– 195,8	1,165
	P	0,216	5, 3	44,1	280	1 820
	As	0,250	3, 5		610	5 730
	Sb	0,323	3, 5	630,5	1 440	6 620
	Bi	0,364	3, 5	271,3	1 420	9 800
Halkogeni elementi						
VI.	O		2	– 218,8	– 183,0	1,332
	S	0,212	6, 4, 2	119,0	444,6	2 070
	Se	0,232	4, 6, 2	220	680	4 810
	Te	0,290	2, 4, 6	450	1 390	6 240

[1] *Valencija* je svojstvo atoma nekog elementa da se spaja s određenim brojem atoma kojeg drugog elementa.

Svojstva elemenata *(konac)*

Element Skupina	Znak	Promjer atoma $\frac{d}{nm}$	Valencija	Talište $\frac{t_t}{°C}$	Vrelište $\frac{t_v}{°C}$	Gustoća (20 °C) $\frac{\varrho}{kg/m^3}$
Halogeni elementi						
VII.	F	0,136	1	− 223	− 188,2	1,578
	Cl	0,194	1, 7, 5	− 101	− 34,7	3,000
	Br	0,226	1, 5	− 7,2	58	3 120
	J	0,270	1, 5, 7	114	183	4 930
Plemeniti plinovi						
VIII.	He		0	− 271,4	− 268,9	0,166
	Ne	0,320	0	− 248,6	− 246,0	0,839
	Ar	0,382	0	− 189,4	− 185,8	1,663
	Kr	0,400	0	− 157	− 152	3,488
	Xe	0,440	0	− 112	− 108	5,495
Kovine sporednih skupina						
4. perioda	Ti	0,293	4, 3	1 820	5 100	4 540
	V	0,271	5, 4, 2	1 735	3 400	6 000
	Cr	0,257	3, 6, 2	1 930	2 500	7 190
	Mn	0,250	2, 3, 4	1 245	2 150	7 430
	Fe	0,252	3, 2	1 539	2 740	7 870
	Co	0,250	2, 3	1 492	2 900	8 900
	Ni	0,249	2, 3	1 453	2 730	8 900
	Cu	0,255	2, 1	1 083	2 600	8 960
	Zn	0,275	2	419,5	906	7 133
5. perioda	Zr	0,319	4	1 750	5 050	6 500
	Nb	0,294	5, 3	2 415	3 300	8 570
	Mo	0,280	6, 3, 5	2 625	4 800	10 200
	Tc		7			11 460
	Ru	0,267	3, 4, 6	2 500	4 900	12 200
	Rh	0,270	3, 4	1 960	4 500	12 440
	Pd	0,275	2, 4	1 552	4 000	12 000
	Ag	0,288	1	960,8	2 210	10 490
	Cd	0,304	2	320,9	765	8 650
6. perioda	Hf	0,317	4		3 700	11 400
	Ta	0,294	5	2 996	6 100	16 600
	W	0,282	6, 4	3 380	5 930	19 300
	Re	0,275	7, 4, 1	3 170	5 900	20 000
	Os	0,270	4, 6	2 700	5 500	22 500
	Ir	0,271	4, 3, 6	2 443	5 300	22 500
	Pt	0,277	4, 2	1 769	4 410	21 450
	Au	0,288	1, 3	1 063	2 970	19 320
	Hg	0,310	2, 1	− 38,9	356,6	13 550

KEMIJSKI SPOJEVI

Kemijske veze

1. *Kovalentna veza* (atomna, homopolarna)

Kovalentna veza je veza među nekovinskim atomima. Zajednički elektroni više atoma tvore *molekule*, i to od jednostavnih dvoatomnih do vrlo velikih molekula s više stotina ili tisuća atoma.

Spojevi s kovalentnom vezom (molekulna građa) obuhvaćaju razmjerno manji broj anorganskih spojeva; posebno su značajni organski spojevi.

Anorganski spojevi s kovalentnom vezom jesu:

– pretežno plinovite tvari (s niskim talištima i vrelištima), npr. nekovinski elementi (H_2, O_2, N_2), nekovinski oksidi i hidridi (CO_2, SO_2, NH_3, H_2S) i nekovinski spojevi (SCl_2, PCl_3);

– dijamantne tvari (s visokim talištima i vrelištima) s vrlo jakom kovalentnom vezom (tvrdoća!), npr. dijamant (C) i nekovinski karbidi (SiC, B_4C). Njima su slični također nekovinski nitridi (BN, Si_3N_4).

Organski spojevi sežu od malih molekula, npr. jednostavnih ugljikovodika (CH_4, C_2H_6), do veoma velikih molekula, npr. polivinilklorida $(C_2H_3Cl)_n$. S porastom broja atoma u molekuli, te tvari prelaze iz plinovitih u tekuće i potom u krute. Ne vode električnu struju.

2. *Ionska veza* (heteropolarna, elektrovalentna)

Ionske veze nastaju među kovinskim i nekovinskim atomima tako da kovinski atomi otpuštaju vanjske (valentne) elektrone (jedan ili više njih) te postaju pozitivnim ionima – kationima, a nekovinski atomi pak primaju te elektrone i postaju negativnim ionima – anionima. U plinovitom ili tekućem stanju (ili u otopini) pozitivni se i negativni ioni slobodno gibaju, a u krutom stanju tvore zajedno kristalnu rešetku.

Ionske su veze karakteristične za kovinske okside (npr. Na_2O) i hidrokside (npr. NaOH) a osobito za soli, koje su spojevi pozitivnih (kovinskih) i negativnih (nekovinskih) iona ($NaCl = Na^+ + Cl^-$).

Soli imaju visoka tališta i vrelišta te su pravi elektroliti; u taljevini ili otopini vode električnu struju, pri čemu su ioni nositelji naboja.

3. *Kovinska veza*

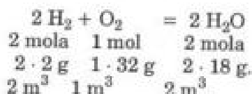
Kovinska veza je veza među kovinskim atomima.

U kristalnim rešetkama, koje tvore sve kovine, atomi otpuštanjem valentnih elektrona postaju pozitivno nabijeni ioni, među kojima se valentni elektroni u rešetki gibaju razmjerno slobodno.

Kovinska je veza karakteristična za sve kovine i njihove slitine, a odlikuje se osobito dobrom električnom i toplinskom vodljivosti te tvrdoćom i duktilnosti (mogućnosti preoblikovanja, kovkosti).

Kemijske reakcije

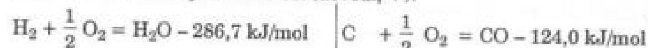
Jednadžbe kemijskih reakcija prikazuju množinske odnose sudjelnih tvari



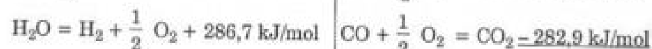
$$2\,H_2 + O_2 = 2\,H_2O$$
2 mola 1 mol 2 mola
$2 \cdot 2$ g $1 \cdot 32$ g $2 \cdot 18$ g.

U plinovitom stanju: 2 m^3 1 m^3 2 m^3.

Pri egzotermnim reakcijama toplina se oslobađa (odvodi, –), a pri endotermnim reakcijama se troši (dovodi, +):



$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O - 286{,}7\ \text{kJ/mol} \qquad C + \frac{1}{2}O_2 = CO - 124{,}0\ \text{kJ/mol}$$



$$H_2O = H_2 + \frac{1}{2}O_2 + 286{,}7\ \text{kJ/mol} \qquad CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2 \underline{- 282{,}9\ \text{kJ/mol}}$$



$$C + O_2 = CO_2 - 406{,}9\ \text{kJ/mol}$$

Pri kemijskoj reakciji odvedena ili dovedena toplina nije ovisna o toku reakcije – po međustupnjevima ili neposredno (Hessov zakon).

Reakcije redukcija-oksidacija (»redoks«) nastaju iz djelomičnih reakcija redukcije (oduzimanje kisika spoju) i oksidacije (spajanje s kisikom).

Hidridi

Hidridi su binarni spojevi vodika s nekovinama ili s nekim kovinama. Plinoviti su, tekući ili kruti (nekovinski su hidridi plinoviti ili tekući).

Svojstva vodika i nekovinskih hidrida

Tvar	Relativna molekulna masa M_r	Talište $\frac{t_t}{°C}$	Vrelište $\frac{t_v}{°C}$	Gustoća (0° C) $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Napomena
Vodik					
H_2	2,016	–259,4	– 252,7	0,090	
Hidridi					
H_2O [1]	18,02	0,00	100,0	1000,0 (4 °C)	voda (H oksid)
H_2O_2 [1]	34,01	– 89	152,1	1465	H peroksid
NH_3 [2]	17,03	– 77,7	– 33,35	0,771	amonijak
HF	20,01	– 92,3	19,4	987	fluorovodik
HCl	36,46	– 112	– 83,7	1,64	klorovodik
HBr	80,92	– 88,5	– 67,0	3,50	bromovodik
HJ	127,91	– 50,8	– 35,4 (4 bar)	5,66	jodovodik
H_2S	34,08	– 82,9	– 61,8	1,54	sumporvodik
H_3P	34,00	– 133,5	– 87,4	1,53	fosforvodik
HCN [3]	27,03	– 14	26	688	cijanovodik

[1] Voda i vodikov peroksid su istodobno hidrid i oksid.
[2] Pozitivno nabijena jednovaletna skupina NH_4^+ = »amonij«.
[3] Negativno nabijena jednovalentna skupina CN^- = »cijan«.

Oksidi

Oksidi su binarni spojevi kisika s elementima te su plinoviti, tekući ili kruti. Elementi s više valencija mogu imati i više različitih oksida.

Svojstva kisika i oksida (pri p_a = 1,013 25 bar)

Tvar	Relativna molekulna masa M_r	Talište (s = subl.) $\frac{t_t}{°C}$	Vrelište $\frac{t_v}{°C}$	Gustoća (0 °C) $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Napomena
Kisik					
O_2	32,00	– 218,8	– 183,0	1,429	
Nekovinski oksidi					
CO	28,01	– 207	– 191,5	1,250	C(II) oksid (C monoksid)
CO_2	44.01	– 78,5 s	–	1,977	C(IV) oksid (C dioksid)
N_2O	44,01	– 102,3	– 91,7	1,978	N(I) oksid
NO	30,01	– 161	– 151	1,340	N(II) oksid, N monoksid
NO_2	46,01	– 9,3	21,3	1 447	N dioksid
N_2O_3	76,01	– 103	3,5	1 447	N(III) oksid, N trioksid
N_2O_5	108,01	30 s	–	2 050	N pentoksid
SO_2	64,06	– 75,5	– 10,0	2,926	S dioksid
SO_3	80,06	16,8	44,5	1 923	S trioksid
P_2O_3	109,95	23,8	173,1	1 943	P trioksid
P_2O_5	141,94	250 s	–	2 387	P pentoksid
SiO_2	60,08	1 710	2 630	2 320	Si dioksid, kremen
Kovinski oksidi					
Na_2O	61,98	1 275 s	–	2 270	
K^2O	94,20	350	–	2 320	
MgO	40,31	2 500	–	3 550	Mg(II) oksid
CaO	56,08	2 572 s	–	3 400	paljeno (živo) vapno
BaO	153,34	1 923	2 000	5 720	
Al_2O_3	101,96	2 050	2 250	4 000	glinica, korund
CrO	68,00	–	–	–	Cr(II) oksid
Cr_2O_3	151,99	2 200	–	5 210	Cr(III) oksid
CrO_3	99,99	196	–	2 800	Cr(IV) oksid
Cu_2O	143,08	1 235	–	6 000	Cu(I) oksid
CuO	79,54	–	–	6 400	Cu(II) oksid
FeO	71,85	1 420	–	5 990	Fe(II) oksid
Fe_2O_3	159,69	1 595	–	5 240	Fe(III) oksid
Fe_3O_4	231,54	1 538	–	5 180	Fe(II), Fe(III) oksid
MnO	70,94	1 650	–	5 090	Mn(II) oksid
Mn_2O_3	157,87	1 080	–	4 500	Mn(III) oksid
Mn_3O_4	228,81	1 705	–	4 856	Mn(II), Mn(III) oksid
MnO_2	86,94	535	–	5 026	Mn(IV) oksid
PbO	223,19	–	–	9 500	Pb(II) oksid
PbO_2	239,19	–	–	9 365	Pb(IV) oksid
TiO	63,90	1 750	–	5 500	
WO_2	215,90	–	–	12 110	W(IV) oksid
WO_3	231,90	1 373	–	7 160	W(VI) oksid
ZnO	81,37	1 700 s	–	5 606	cinkovo bjelilo

Karbidi

Karbidi su binarni spojevi ugljika s kovinama, te s nekovinama B i Si. Karbidi su čvrste (i vrlo tvrde) tvari visoka tališta.

Svojstva ugljika i karbida

Tvar	Relativna molekulna masa M_r	Talište (s = subl.) $\frac{t_t}{°C}$	Vrelište $\frac{t_v}{°C}$	Gustoća (0 °C) $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Napomena
Ugljik					
grafit	12,01	3 700	4 830	2 220	gustoća amorfnoga C:
dijamant	12,01	> 3 500	–	3 510	1 970 kg/m³
Karbidi					
B_4C	55,25	2 350	3 500	2 515	brusna tvar
SiC	40,10	2 700 s	–	3 170	karborund
CaC_2	64,10	2 300	–	2 220	s vodom: C_2H_2
Cr_3C_2	180,01	1 890	–	6 680	u čelicima
Cr_5C_2	284,00	1 665	–	6 950	
Fe_3C	179,55	1 837	–	7 680	cementit
Mn_3C	176,83	–	–	6 890	
MoC	107,95	2 570	–	8 400	
NbC	104,92	3 500	–	8 200	
TaC	192,96	3 877	5 500	13 960	karbidne
TiC	59,91	3 140	4 300	4 250	tvrde kovine
VC	62,95	2 830	3 900	5 380	
WC	195,86	2 777	–	15 700	karbidne
W_2C	379,71	2 857	–	16 060	tvrde kovine

Nitridi

Nitridi su binarni spojevi dušika s kovinama, a među nekovinama posebno s B.

Svojstva dušika i nitrida

Tvar	Relativna molekulna masa M_r	Talište (s = subl.) $\frac{t_t}{°C}$	Vrelište $\frac{t_v}{°C}$	Gustoća (0 °C) $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Napomena
Dušik					
N_2	28,01	– 209,86	– 195,8	1,251	
Nitridi					
BN	24,82	2 730 s	–	2 255	u čelicima za nitriranje
AlN	40,99	2 200 (4 bar)	–	3 050	
CrN	66,00	1 500	–	–	
Fe_2N	125,70	200	–	6 350	
Fe_4N	237,39	–	–	6 570	
NbN	106,91	2 050	–	8 260	
TaN	194,95	3 360	–	14 100	
TiN	61,91	3 220	–	5 190	
VN	64,95	2 320	–	5 630	

Sulfidi

Sulfidi su binarni spojevi sumpora s kovinama, a među nekovinama posebno s C (za H vidi hidridi, str. 110).

Svojstva sumpora i sulfida

Tvar	Relativna molekulna masa M_r	Talište $\frac{t_t}{°C}$	Vrelište (s = subl.) $\frac{t_v}{°C}$	Gustoća (0 °C) $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Napomena
Sumpor					
amorfan	32,06	120	444,6	2 046	
kristalan	256,48	119,0	444,6	1 960	monoklinski (β)
		112,8	–	2 070	rompski (α)
Sulfidi					
CS_2	76,13	– 111,6	46,3	1 261	
Al_2S_3	150,12	1 110	1 550 s	2 020	
CrS	84,07	1 350	–	4 100	
Cu_2S	159,20	1 100	–	5 600	ortorompski
		1 130	–	5 780	kubični
CuS	95,63	–	220	4 600	
FeS	87,90	1 193	–	5 010	
FeS_2	119,96	1 171	–	5 000	pirit
MnS	86,99	–	1 375 s	4 000	
MoS_2	160,07	1 185	–	4 800	
PbS	239,27	1 114	–	7 500	
SnS	150,76	882	1 240	5 080	
WS_2	248,04	–	–	7 500	
ZnS	97,44	1 850 (150 bar)	1 200 s	4 087	

Fosfidi

Fosfidi su binarni spojevi fosfora s kovinama.

Svojstva fosfora i fosfida

Tvar	Relativna molekulna masa M_r	Talište $\frac{t_t}{°C}$	Vrelište $\frac{t_v}{°C}$	Gustoća (0 °C) $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Napomena
Fosfor					
crni	123,92	–	–	2 690	plamište 400 °C
crveni	123,92	610 (43 bar)	–	2 200	plamište 725 °C
bijeli	123,92	44,1	280	1 820	
Fosfidi					
CrP	83,03	–	–	5 700	
Cu_3P	221,73	–	–	6 700	
Cu_3P_2	252,75	–	–	6 350	
SnP_3	211,76	415	–	4 100	
Fe_2P	142,70	1 290	–	6 560	
Fe_3P	198,54	1 100	–	6 740	
MnP	85,95	1 190	–	5 390	

Kiseline i baze

Kiseline su tvari kojih molekule ili ioni u vodenim otopinama lako otpuštaju protone (vodikove jezgre H^+).

Kiseline su vodene otopine spojeva vodika s halogenima ili drugim nekovinama (»kiseline bez kisika«), ili pak nastaju pri reakciji nekovinskih oksida s vodom (»kiseline s kisikom«), npr:

– *kiseline bez kisika*

fluorovodična (fluoridna)	= vodena otopina HF
klorovodična (kloridna)	= vodena otopina HCl
bromovodična (bromidna)	= vodena otopina HBr
jodovodična (jodidna)	= vodena otopina HJ
sumporovodična (sulfidna)	= vodena otopina H_2S
fosforovodična (fosfidna)	= vodena otopina H_3P
cijanovodična (cijanidna)	= vodena otopina HCN

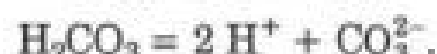
– *kiseline s kisikom*

ugljična (karbonatna)	H_2CO_3	$(CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3)$
sumporasta (sulfitna)	H_2SO_3	$(SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3)$
sumporna (sulfatna)	H_2SO_4	$(SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4)$
dušična (nitratna)	HNO_3	$(N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2\ HNO_3)$
fosforna (fosfatna)	H_3PO_4	$(P_2O_5 + 3\ H_2O \rightarrow 2\ H_3PO_4)$.

Karakteristični sastojak svih kiselina je vodik, koji je u vodenoj otopini pozitivno nabijen ion H^+, dok je drugi dio kiseline negativno nabijena nekovina ili atomna skupina:



$$HCl = H^+ + Cl^-$$



$$H_2CO_3 = 2\ H^+ + CO_3^{2-}.$$

Baze (lužine) su spojevi kojih molekule ili ioni lako primaju protone.

Baze su hidroksidi koji nastaju pri reakciji određenih kovina, kovinskih oksida ili amonijaka s vodom, npr:

natrijev hidroksid	NaOH	$2\ Na + 2\ H_2O \rightarrow 2\ NaOH + H_2 \uparrow$
		$Na_2O + H_2O \rightarrow 2\ NaOH$
kalijev hidroksid	KOH	$2\ K + 2\ H_2O \rightarrow 2\ KOH + H_2 \uparrow$
		$K_2O + H_2O \rightarrow 2\ KOH$
kalcijev hidroksid	$Ca(OH)_2$	$Ca + 2\ H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + H_2 \uparrow$
(gašeno vapno)		$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$
amonijev hidroksid	NH_4OH	$NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4OH$

Značajan sastojak baza je negativno nabijena jednovalentna skupina OH – »hidroksidni ion«.

Vodene otopine baza nazivaju se lužine, a sadrže pozitivne kovinske ione i negativne hidroksidne ione (pa su dobri vodiči električne struje), što vrijedi i za taljevine baza:



$$NaOH = Na^+ + OH^-.$$

Svojstva kiselina i baza

Kiselina = vodena otopina	Topivost (0 °C) vode g/kg	Topivost (0 °C) koncentracija max %	Kiselina = vodena otopina	Topivost (0 °C) vode g/kg	Topivost (0 °C) koncentracija max %
HF		100	H_2S	6,7	0,67
HCl	823	45	H_3P	0,4	0,04
HBr	2210	69	CO_2	3,4	0,34
HJ	2,4	0,24	SO_2	228	18,6
HCN		100			

Tvar	Relativna molekulna masa M_r	Talište $\frac{t_t}{°C}$	Vrelište $\frac{t_v}{°C}$	Gustoća (0 °C) $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Napomena
Kiseline					
H_2SO_4	98,08	10,5	-	1 834	sumporna kiselina
HNO_3	63,02	– 42	86	1 508	dušična kiselina
H_3PO_4	98,00	42,35	213	1 834	fosforna kiselina
$HClO_4$	100,47	– 112	(39)	1 764	(perklorna kiselina) (eksplozivna)
Baze					vodene otopine:
NaOH	40,00	318,4	1 388	2 130	– natrijeva lužina
KOH	56,11	360,4	1 320	2 044	– kalijeva lužina
$Ca(OH)_2$	74,10	580	-	2 239	– gašeno vapno
NH_4OH	35,05	– 77	-	-	– amonijačna voda (amonijev hidroksid)

Vrijednost pH

Stupanj kiselosti vodenih otopina je »vrijednosti pH« (= *potentia hydrogenii*), koja je definirana negativnim dekadnim logaritmom koncentracije vodikovih iona a (mol · L^{-1}):

$$pH = -\lg a.$$

Otuda proizlaze vrijednosti za:

kisele otopine	$a > 10^{-7}$	$pH < 7$
neutralne otopine (čista voda)	$a = 10^{-7}$	$pH = 7$
bazične otopine	$a < 10^{-7}$	$pH > 7$ (... 14).

Vrijednost pH mjeri se pH-metrima, a može se ocijeniti pomoću obojenih indikatora koji pri određenim vrijednostima pH mijenjaju boju, npr.:

Indikator	pH
metiloranž	crven 3 – 4,4 žut
metilno crvenilo	crveno 4,4 – 6,2 žuto
lakmus	crven 5 – 8 modar
bromtimol (modri)	žut 6 – 7,5 modar
fenolftalein	bezbojan 8 – 10 crven

Soli

Soli nastaju pri reakciji kiseline s bazom:



$$HCl + NaOH \rightarrow NaCl + H_2O \qquad H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2\,H_2O.$$

Soli također nastaju

– pri djelovanju halogenih elemenata na kovine:



$$Cl_2 + 2\,Na \rightarrow 2\,NaCl$$

– pri djelovanju nekovinskih oksida na kovinske okside ili baze:



$$SO_3 + CaO \rightarrow CaSO_4 \qquad CO_2 + 2\,NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O$$

– pri djelovanu kiselina na neplemenitu kovinu ili kovinski oksid:



$$2\,HCl + Zn \rightarrow ZnCl_2 + H_2\uparrow \qquad H_2SO_4 + CuO \rightarrow CuSO_4 + H_2O.$$

Nazivi za soli

Nazivi soli iz kiselina bez kisika završavaju na -id:

CaF_2	– Ca fluorid	Cu_3P	– Cu fosfid
$NaCl$	– Na klorid	KCN	– K cijanid
$AgBr$	– Ag bromid	$K_4Fe(CN)_6$	– K Fe(II) cijanid
KJ	– K jodid	$K_3Fe(CN)_6$	– K Fe(III) cijanid
PbS	– Pb sulfid		

Nazivi soli iz kiselina s kisikom svršavaju na -at (it):

Na_2CO_3	– Na karbonat	$KClO_4$	– K klorat
$NaHCO_3$	– Na hidrokarbonat	K_2SiO_3	– K silikat
Na_2SO_3	– Na sulfit	K_2CrO_4	– K kromat
Na_2SO_4	– Na sulfat	$K_2Cr_2O_7$	– K bikromat
$Na_2S_2O_3$	– Na tiosulfat	$KMnO_4$	– K manganat
$NaNO_3$	– Na nitrat	$KAl(SO_4)_2$	– K Al sulfat
Na_3PO_4	– Na fosfat		
Na_2HPO_4	– Na hidrofosfat		
NaH_2PO_4	– Na bihidrofosfat		

Posebno značajne alkalne soli

Sol	Na	K	Ca	Ba	NH_4^+
klorid	$NaCl$ kuhinjska sol	KCl	$CaCl_2$	$BaCl_2$	NH_4Cl salmijak
karbonat	Na_2CO_3 kalcinirana soda	K_2CO_3 potaša	$CaCO_3$ vapnenac	$BaCO_3$	$(NH_4)_2CO_3$
sulfat	Na_2SO_4	K_2SO_4	$CaSO_4$ sadra	$BaSO_4$ barit	$(NH_4)_2SO_4$
nitrat	$NaNO_3$ čilska salitra	KNO_3 indijska salitra			NH_4NO_3

Svojstva soli

Sol	Relativna molekulna masa M_r	Talište (s = subl.) t_t/°C	Vrelište t_v/°C	Gustoća (0 °C) ϱ/kg/m³	Napomena
$BaCl_2$	208,25	962	1 560	3 856	
$BaCO_3$	197,35	1 380	–	4 430	
$BaSO_4$	233,40	1 453	–	4 500	baritno bjelilo
$Ba(NO_3)_2$	261,35	595	–	3 245	
$BaCrO_4$	253,33	–	–	4 600	
$CaCl_2$	110,99	782	1 600	2 152	
$CaCO_3$	100,09	898,6 s	–	2 711	vapnenac, kreda
$CaCO_3 \cdot MgCO_3$	184,41	–	–	–	dolomit
$CaSO_4$	136,14	1 450	–	2 960	sadra (gips)
$CaSO_4 \cdot 2\,H_2O$	172,16	128	163	2 320	
$Ca_3(PO_4)_2$	310,14	1 670	–	3 080	
$CaHPO_4 \cdot 2\,H_2O$	172,09	25	100	2 316	
$CaCrO_4 \cdot 2H_2O$	192,10	200	–	–	
$CaSiO_3$	116,16	1 540	–	2 905	
$CuCl_2$	134,45	498	993	3 054	
CuS	95,60	103	220	4 600	
$CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$	221,08	200	–	4 000	
$CuSO_4$	159,60	200	650	3 600	
$CuSO_4 \cdot 5\,H_2O$	249,68	110	150	2 284	modra galica
$FeCl_2$	126,75	672	1 023	2 988	Fe(II) klorid
$FeCl_3$	162,21	282	315	2 894	Fe(III) klorid
$FeSO_4 \cdot H_2O$	169,92	–	–	3 040	
$FeSO_4 \cdot 7\,H_2O$	278,02	64	300	1 898	zelena galica
KCl	74,56	776	1 417	1 989	
KCN	65,12	634,5	–	1 560	cijankalij
$KHCO_3$	100,12	150	–	2 180	K bikarbonat
K_2CO_3	138,21	896	–	2 267	potaša
K_2SO_4	174,27	588	1 069	2 664	
KNO_3	101,11	337	400	2 100	indijska salitra
K_3PO_4	212,28	1 340	–	2 564	
K_2HPO_4	174,18	–	–	–	
KH_2PO_4	136,09	252,6	300	2 338	
$KClO_4$	138,55	610	–	2 525	
K_2SiO_3	154,29	976	–	–	
$KMnO_4$	158,04	240	–	2 703	permanganat
K_2CrO_4	194,20	968	–	2 732	
$K_2Cr_2O_7$	294,19	236	500	2 690	

Svojstva soli (*konac*)

Sol	Relativna molekulna masa M_r	Talište (s = subl.) $\frac{t_t}{°C}$	Vrelište $\frac{t_v}{°C}$	Gustoća (0 °C) $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Napomena
$KAl(SO_4)_2 \cdot 12\,H_2O$	474,39	92	–	1 750	stipsa (alaun)
$K_3Fe(CN)_6$	329,26	–	–	1 894	crvena krvna sol
$K_4Fe(CN)_6 \cdot 3\,H_2O$	422,41	70	–	1 850	žuta krvna sol
$MgCl_2$	95,22	712	1 412	2 316	
$MgCO_3$	84,32	350	900	3 010	magnezit
$MgSO_4$	120,37	1 124	–	2 660	
$MgSO_4 \cdot 7\,H_2O$	246,48	150	200	1 636	gorka sol
NaF	41,99	993	1 702	2 790	
$NaCl$	58,44	801	1 449	2 165	kuhinjska sol
$NaBr$	102,90	756	1 393	3 203	
NaJ	149,89	665	1 300	3 665	
$NaCN$	49,01	563,7	1 500	–	
$NaHCO_3$	84,01	270	–	2 221	soda bikarbona
Na_2CO_3	105,99	860	–	2 533	kalcinirana soda
$Na_2CO_3 \cdot 10\,H_2O$	286,14	–	–	1 446	kristalna soda
Na_2SO_4	142,04	884	–	2 698	
$Na_2SO_4 \cdot 10\,H_2O$	322,19	–	–	1 465	Glauberova sol
$NaNO_3$	84,99	306,8	380	2 267	čilska salitra
$Na_3PO_4 \cdot 10\,H_2O$	344,09	100	–	2 536	
$Na_2HPO_4 \cdot 2\,H_2O$	177,99	95	–	2 066	
$NaH_2PO_4 \cdot H_2O$	137,99	100	200	1 910	
Na_2SiO_3	122,06	1 088	–	2 400	
$Na_2S_2O_3 \cdot 5\,H_2O$	248,18	48	70	1 750	fiksirna sol
NH_4Cl	53,49	–	–	1 527	salmijak (nišador)
NH_4Br	97,95	542 s	–	2 429	bijela sol (fot.)
NH_4HCO_3	79,06	107,5	–	1 573	
$(NH_4)_2CO_3 \cdot H_2O$	114,10	60	–	–	
$(NH_4)_2SO_4$	132,14	100	–	1 770	
NH_4NO_3	80,04	169,6	210	1 725	umjetno gnojivo
$(NH_4)_2HPO_4$	132,06	–	–	1 619	
$NH_4H_2PO_4$	115,03	–	–	1 794	
PbS	239,25	1 114	–	7 500	
$PbSO_4$	303,25	1 000	–	6 380	
$PbCrO_4$	323,18	844	–	6 300	
$ZnCl_2$	136,28	283	730	2 910	
ZnS	97,43	1 020	–	4 102	
$ZnCO_3$	125,38	300	–	4 440	

Organski spojevi

Svi organski spojevi sadrže ugljik. Međutim, u organske spojeve ne ubrajaju se sljedeći anorganski spojevi s C:

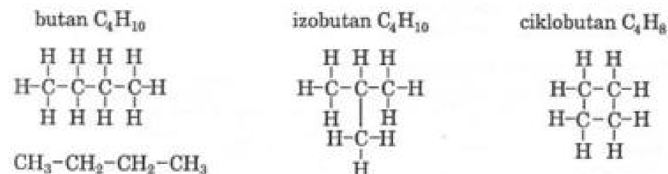
ugljični oksidi	CO, CO_2	ugljični disulfid	CS_2
ugljične kiseline	H_2CO_3	cijanovodik	CN
karbonati, npr.	$CaCO_3$	cijanidi, npr.	KCN
karbidi, npr.	CaC_2	i sl.	

Organski su spojevi najčešće sastavljeni od ugljika i vodika (ugljikovodici), a često sadrže još N i S. U načelu su u organskim spojevima mogući svi elementi. U organskim spojevima prevladava prvenstveno kovalentna veza.

Nazivi organskih spojeva po broju atoma C u molekuli:

1 atom: met–	5 atoma: pent–	9 atoma: non–
2 atoma: et–	6 atoma: heks–	10 atoma: dek–
3 atoma: prop–	7 atoma: hept–	
4 atoma: but–	8 atoma: okt–	

Za molekule organskih spojeva karakteristična je atomna struktura ugljika, koji se veže u lance (lančasti = aciklički, alifatski spojevi) ili u prstene (prstenasti = ciklični spojevi). Molekule jednakog sastava mogu imati različite strukture (izomeri):



Ugljikovodici su

zasićeni:		– alkani, npr. etan	CH_3-CH_3
nezasićeni:	s dvojnim vezama	– alkeni, npr. eten	$CH_2=CH_2$
	s trojnim vezama	– alkini, npr. etin	$CH\equiv CH$.

Nezasićeni ugljikovodici teže pretvorbi u spojeve sa stabilnijom vezom (u zasićene). Stoga su nezasićeni ugljikovodici kemijski vrlo aktivni pa se također spajaju u velike molekule (polimeri).

Alkili (opća oznaka –R) jesu atomne skupine koje imaju jedan vodikov atom manje negoli odgovarajući alkani, npr.

metil – CH_3	propil – C_3H_7	pentil (amil) – C_5H_{11}
etil – C_2H_5	butil – C_4H_9	

Organski spojevi, koji uz C i H sadrže i druge elemente, mogu se razvrstati s obzirom na karakteristične atomne skupine (prema kojima imaju i slična kemijska svojstva).

Sustavne skupine organskih spojeva

Skupina: Naziv	Skupina: Funkcionalna skupina	Broj atoma C u molekuli: 1	2	3
alkalni (parafini)	C – C (jednostruka veza)	CH_4 metan	C_2H_6 etan	C_3H_8 propan
alkeni (olefini)	C = C (dvojna veza)	–	C_2H_4 eten	C_3H_6 propen
alkini (acetileni)	C ≡ C (trostruka veza)	–	C_2H_2 etin (acetilen)	C_3H_4 propin
alkanoli (alkoholi)	– OH (hidroksilna skupina)	CH_3OH metanol (metilalkohol)	C_2H_5OH etanol (etilalkohol)	C_3H_7OH propanol (propilalkohol)
alkanali (aldehidi)	– CHO (aldehidna skupina)	HCHO metanal (formaldehid)	CH_3CHO etanal (acetaldehid)	C_2H_5CHO propanal (propionaldehid)
alkanske kiseline (karboksilne k.)	– COOH (karboksilna skupina)	HCOOH metanska k. (mravlja k.)	CH_3COOH etanska k. (octena k.)	C_2H_5COOH propanska k.
alkanoni (ketoni)	– CO – (karbonilna skupina)			$(CH_3)_2CO$ propanon (aceton)

Primjeri značajnih organskih skupina

Spoj	Karakteristična grupa	Primjer	
eteri	– O –	$C_2H_5 – O – C_2H_5$	dietileter
esteri	– COO –	$CH_3 – COO – CH_3$	metiletanat
epoksidi	–C–C– (s O u prstenu)	$CH_2Cl – HC – CH_2$ (s O u prstenu)	klorepoksipropan
amini	– NH_2	$C_2H_5 – NH_2$	etilamin
amidi	– $CONH_2$	$C_2H_5 – CONH_2$	propanamid
nitrili	– CN	$CH_2 = CH – CN$ (vinil: $CH_2 = CH$)	propennitril (vinilcianid)

Aromatski ugljikovodici (benzenskog tipa)

benzen (benzol) C_6H_6 CH<CH–CH>CH / CH–CH (fenil – C_6H_5)

C_6H_5OH	fenol	$C_6H_4(CH_3)_2$	ksilol
$C_6H_5CH_3$	toluol	$C_6H_4(COOH)_2$	tereftalna kiselina
$C_6H_5C_2H_3$	stirol		
$C_6H_5SO_3H$	benzensulfonska kiselina		

Svojstva nekih organskih spojeva

Spoj		Relativna molekulna masa M_r	Talište t_t/°C	Vrelište t_v/°C	Gustoća (0 °C) ϱ/kg/m³	Napomena
metan	CH_4	16,04	– 182,5	– 161,7	0,717	
etan	C_2H_6	30,07	– 172	– 88,6	1,356	
propan	C_3H_8	44,10	– 187,7	– 42,1	2,019	
n-butan	C_4H_{10}	58,12	– 138,3	– 0,5	2,703	
izobutan	C_4H_{10}	58,12	– 159,6	– 11,7	2,668	
ciklobutan	C_4H_8	56,11	– 50	10*	703	
n-oktan	C_8H_{18}	114,23	– 57,0	125,8	764	
izooktan	C_8H_{18}	114,23	– 107,4	99,3	691	
eten	C_2H_4	28,05	– 169	– 103,5	1,260	»etilen«[1]
propen	C_3H_6	42,08	– 185,3	– 47,7	1,915	»propilen«[1]
buten	C_4H_8	56,05	– 130	– 6,5	2,500	»butilen«[1]
ciklobuten	C_4H_6	54,09	– 1	2**	733	
etin	C_2H_2	26,04	– 81,5	– 83,6	1,171	acetilen
propin	C_3H_4	40,07	– 102,7	– 23,2	–	
butin	C_4H_6	54,09	– 32,2	27	693	
metanol	CH_3OH	32,04	– 97,8	64,7	792	metilalkohol
etanol	C_2H_5OH	46,07	– 112	78,4	789	etilalkohol
propanol	C_3H_7OH	60,10	– 127	97,8	804	propilalkohol
butanol	C_4H_9OH	74,12	– 79,9	117	810	butilalkohol
metanal	HCHO	30,03	– 92	– 21	–	formaldehid[2]
etanal	CH_3CHO	44,05	– 123,5	20,2	783	acetaldehid
propanal	C_2H_5CHO	58,08	– 81	49,5	807	
butanal	C_3H_7CHO	72,11	– 99	75,7	817	
metanska kiselina	HCOOH	46,03	8,6	100,8	1 220	mravlja kis.
etanska kiselina	CH_3COOH	60,05	16	118,1	1 049	octena kis.
propanska kiselina	C_2H_5COOH	74,08	– 22	141,1	992	propionska kis.
butanska kiselina	C_3H_7COOH	88,11	– 4,7	164	964	maslačna kis.
propanon	$(CH_3)_2CO$	58,08	– 94,6	56,5	792	aceton
propantriol	$(CH_2OH)_2CHOH$	92,09	17,9	290	1 260	glicerin
monoklormetan	CH_3Cl	50,49	– 97,7	– 24	1,785	metilklorid

[1] Zastarjeli nazivi!
[2] Rastopina formaldehida u vodi = formalin.
* 968 mbar. ** mbar.

Spoj		Relativna molekulna masa M_r	Talište $\frac{t_t}{°C}$	Vrelište $\frac{t_v}{°C}$	Gustoća (0 °C) $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Napomena
diklormetan	CH_2Cl_2	84,93	− 96,7	−40	1,336	metilenklorid
triklormetan	$CHCl_3$	119,38	− 63,5	61,2	1 489	kloroform
tetraklormetan	CCl_4	153,82	− 22,6	76,8	1 595	ugljikov tetraklorid
monofluortriklorm	$CFCl_3$	137,37	− 111	24,9	1 494	R11, freon 11
difluordiklormetan	CF_2Cl_2	120,91	− 155	−29,2	−	R12, freon 12
monofluordiklormetan	$CHFCl_2$	102,92	− 127	14,5	1 426	R21
monokloretan	C_2H_5Cl	64,52	− 139	13	917	etilklorid
monokloreten	C_2H_3Cl	62,50	− 160	−12	0,908	vinilklorid
naftalen	$C_{10}H_8$	128,18	80,2	217,9	1 145	naftalin
benzen	C_6H_6	78,11	5,5	80,1	879	»benzol«
hidroksibenzen	C_6H_5OH	94,11	42	182	1 071	fenol
aminobenzen	$C_6H_5NH_2$	93,13	− 6,2	184,4	1 022	anilin
dietileter	$(C_2H_5)_2O$	74,12	− 116,3	34,6	708	eter
etandiol	$C_2H_4(OH)_2$	62,07	− 15,6	197,4	1 113	glikol
fenolftalein	$C_{20}H_{14}O_4$	318,33	261	−	1 299	
celuloza	$(C_6H_{10}O_5)_n$	$(162{,}14)_n$	−	−	1 350	
glukoza	$C_6H_{12}O_6$	180,16	146	−	1 544	dekstroza
saharin	$C_7H_5O_3NS$	183,19	226 s	−	−	
salicilna kis.	HOC_6H_4COOH	138,12	159	−	1 443	salicil
fozgen	$COCl_2$	98,92	−104	8,2	1,392	
iperit	$(C_2H_4Cl)_2S$	159,08	14	216	1 279	
glicerilnitrat	$(O_2NO)_3C_3H_5$	227,09	13,3	160 (20 mbar)	1 601	nitroglicerin
trinitrotoluen	$(NO_2)_3C_6H_2CH_3$	227,13	81	280 ekspl.	1 654	trotil (TNT)

Polimeri

Polimeri (umjetni organski spojevi) jesu makromolekulni organski spojevi koji nastaju nizanjem molekula osnovnih tvari – monomera – u makromolekule s vrlo velikim brojem atoma (do 1 000 i više). Relativna molekulna masa polimera iznosi prosječno približno 10^4 do 10^7.

Brojem molekula – monomera, od kojih se sastoji molekula polimera, određen je *stupanj polimerizacije*. S porastom stupnja polimerizacije mijenjaju se i svojstva polimera (viskoznost, mogućnost preoblikovanja, čvrstoća, topivost itd.).

Pojedine molekule polimera nisu jednake veličine. Stoga se stupanj polimerizacije može smatrati samo srednjim. Budući da je broj kemijski vezanih molekula (monomera) u molekuli polimera vrlo velik, to manje razlike u veličini makromolekula neće bitno utjecati na promjenu njihovih svojstava.

Najobičniji oblik makromolekule proizlazi iz lančastog nizanja monomera.

Polimeri se dobivaju iz monomera sintetski ili preradbom prirodnih tvari. Glavni postupci za dobivanje polimera jesu:

a) *Polimerizacija*, organska kemijska reakcija spajanja jednakih ili različitih nezasićenih spojeva s malenim molekulama u makromolekulne tvari, i to bez nastajanja nusprodukta.

b) *Polikondenzacija*, kemijska reakcija pri kojoj se osnovne tvari s malenim molekulama vežu u makromolekule uz izlučivanje nusprodukata (naročito vode, alkanola, halogenida).

c) *Poliadicija*, organska kemijska reakcija spajanja različitih spojeva s malenim molekulama u makromolekulne tvari, bez nastajanja nusprodukata.

Kopolimerizacija, polimerizacija barem dvaju različitih monomera, pri čemu nastaju makromolekule koje sadrže međusobno povezane monomerne molekule kao osnovne skupine.

Kopolimerizacijom nastaju polimerne tvari kojih svojstva mogu biti u širokim granicama prilagođena potrebama njihove primjene.

Primjeri najznačajnijih polimera:

celuloza	$(C_6H_{10}O_5)_n$	polietilen	$(C_2H_4)_n$
prirodni kaučuk	$(C_5H_8)_n$	polipropilen	$(C_3H_6)_n$
sintetski kaučuk:		polistirol	$(C_8H_8)n$
− buna S	$(C_{12}H_{14})_n$	polivinilklorid	$(C_2H_3Cl)_n$
− buna N	$(C_7H_9N)_n$	poliakrilnitril	$(C_3H_3N)_n$
silikon	$(RSiO_2)_n$	poliamid	$(C_6H_{11}ON)_n$

Pregled tvari

<table>
<tr><td rowspan="4">Čiste tvari</td><td rowspan="2">elementi</td><td colspan="2">čisti (samo jedna vrsta atoma)</td><td rowspan="7">jedna faza</td></tr>
<tr><td colspan="2">miješani (najmanje dva izotopa)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">spojevi</td><td colspan="2">anorganski</td></tr>
<tr><td colspan="2">organski</td></tr>
<tr><td rowspan="7">Smjese
(disperzni sustavi)</td><td rowspan="3">homogene smjese
(molekularna disperzija)
veličina čestica < 1 nm</td><td colspan="2">plinovite smjese (zrak)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">(prave) otopine</td><td>tekuće otopine
- plinova (CO_2 u vodi)
- tekućina (alkohol u vodi)
- krutina (sol u vodi)</td></tr>
<tr><td>krute otopine
- kristali mješanci (austenit)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">heterogene smjese
- jedna tvar u različitim fazama (voda i led)
- više tvari (voda i ulje) veličina čestica > 1 nm</td><td rowspan="3">koloidne otopine veličina čestica 1 ... 100 nm</td><td>plinoviti dispergenti (aerosoli)
- tekućina (magla)
- krutina (dim, prah)</td><td rowspan="4">više faza</td></tr>
<tr><td>tekući dispergenti
- plinova: (sapunica) koloidna pjena
- tekućina: (mlijeko) koloidna emulzija
- krutina: koloidna otopina</td></tr>
<tr><td>kruti dispergenti
- plinova | krute pjene
- tekućina | (plovućac)
- krutina: koloidni eutektik</td></tr>
<tr><td colspan="2">suspenzije veličina čestica > 100 nm</td></tr>
</table>

Taloženje (sedimentacija) (čestice se talože zbog težine ili pomoću centrifuge):
- grubodisperzne suspenzije lako se talože,
- koloidne otopine talože se pomoću (ultra)centrifuge,
- prave se otopine ne talože.

Filtriranje:
- suspenzije se filtriraju kroz obične filtre (otvori očica 100 nm),
- koloidi se filtriraju kroz specijalne filtre (otvori očica 1 nm),
- prave se otopine ne mogu filtrirati.

MEHANIKA

Veličina gustoća ϱ je definirana kvocijentom mase m neke homogene tvari i obujma V kojega ta tvar zauzima: $\varrho = m/V$. Jedinica SI gustoće jest $[\varrho] = kg/m^3$.

Gustoća nekih tehničkih tvari predočena je u sljedećoj tablici:

Tehničke kovine i spojevi

Tvar	Gustoća $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Tvar	Gustoća $\frac{\varrho}{kg/m^3}$
aluminij:		delta kovina	8 600
- lijevani	2 560	duralumin	2 800
- kovani	2 750	elektron	1 800
aluminijske slitine	2 600 ... 2 900	konstantan	8 800
bakar:		kositar:	
- tekući	8 220	- tekući	7 025
- elektrolitski	8 900 ... 8 950	- lijevani	7 200
- lijevani	8 300 ... 8 920	manganin	8 400
- kovani, valjani	8 800 ... 9 000	mjed (mesing)	8 400 ... 8 800
bijela kovina	7 500 ... 10 100	monel kovina	8 580
bronca:		olovo:	
- kositrena	8 730 ... 8 800	- tekuće	10 640
- aluminijska	7 400 ... 8 200	- lijevano	11 340
cink:		silumin	2 500 ... 2 650
- tekući	6 480	sivi lijev	7 250
- lijevani	6 900	srebro:	
- kovani	7 000 ... 7 200	- lijevano	10 400 ... 10 500
čelik:		- kovano	10 500 ... 10 600
- lijevani	7 850	zlato, lijevano	19 250
- valjani	7 850		
- brzorezni	8 100 ... 9 000		
Nekovinske krutine			
asfalt	1 050 ... 1 380	kolofonij	1 070 ... 1 090
azbest	2 100 ... 2 800	korund	3 750 ... 4 000
azbestna ljepenka	1 200	kreda	1 800 ... 2 600
boksit	2 400 ... 2 600	kremen (kvarc)	2 100 ... 2 650
celofan	1 420	kremeno staklo	2 200
celuloid	1 380	kriolit	2 950
cement	2 200 ... 3 250	led (H_2O)	880 ... 920
grafit	2 000 ... 2 500	mast	910 ... 960
guma (tvrda)	1 150 ... 1 700	pamuk	1 480
gumeni proizvodi	1 000 ... 2 000	papir	700 ... 1 200
kaučuk (sirovi)	910 ... 930	pepeo	1 800 ... 2 400
keramički proizvodi	1 600 ... 3 900	pluto	200 ... 350
koks	1 600 ... 1 900	porculan	2 150 ... 2 450

Tehničke kovine i spojevi *(nastavak)*

Tvar	Gustoća $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Tvar	Gustoća $\frac{\varrho}{kg/m^3}$
smirak	4 000	ugljen	1 200 ... 1 500
smola (prirodna)	1 250 ... 1 330	ugljen, drveni	1 400 ... 1 500
staklo	2 400 ... 3 000	ugljeni briketi	1 250
svila (umjetna)	1 250 ... 1 600	vapnenac	1 500 ... 1 700
šamot	1 800 ... 2 600	vapno:	
šećer	1 610	– živo	900 ... 1 300
škrob	1 530	– gašeno	1 150 ... 1 250
tinjac	2 600 ... 3 200	vosak	980 ... 1 040
treset (posušen)	800 ... 1 600	vuna	1 300 ... 1 400
troska	2 500 ... 3 000	zemlja	1 300 ... 2 000
		Zemlja (planet) [1]	5 530
Kapljevine (pri 15 °C)			
benzin		plinsko ulje iz:	
– laki	680 ... 720	– katrana	880 ... 900
– teški	< 760	– kamenog ugljena	1 000 ... 1 080
cilindarsko ulje	930	– nafte	860 ... 890
katran iz:		– smeđeg ugljena	880 ... 900
– kamenog ugljena	1 100 ... 1 200	repično ulje	911 ... 918
– smeđeg ugljena	850 ... 910	ricinusovo ulje	959 ... 974
katransko ulje iz:		solna otopina	
– kamenog ugljena	1 080	(NaCl) – 10 %	1 071
– smeđeg ugljena	780 ... 1 040	terpentinsko ulje	860
laneno ulje	940	ulje za loženje:	
morska voda	1 020 ... 1 030	– lako	890 ... 980
nafta	700 ... 1 040	– teško	1 020 ... 1 080
parafinsko ulje	900 ... 1 020	voda	999,13
petrolej	760 ... 860		
Gradiva			
zid od prirodnog kamena:		– šuplja opeka	1 450
– granit, porfir	2 600	žbuka:	
– mramor	2 700	– cement	2 100
– pješčenjak	2 400	– sadra	1 200
vapnenac:		– vapno	1 700
– gust	2 600	– vapno-cement	1 900
– porozan	2 200	– beton (od šljunka)	2 200
zid od umjetnog gradiva:		drvo (prosušeno):	
– obična opeka	1 800	– borovina	600...700
– porozna puna opeka	1 100	– brezovina	700...800
– porozna šuplja opeka	1 000	– bukovina	700...800

[1] Ukupna masa Zemlje iznosi 5 960 · 10^{18} t.

Tehničke kovine i spojevi *(konac)*

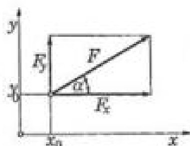
Tvar	Gustoća $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Tvar	Gustoća $\frac{\varrho}{kg/m^3}$
Gradiva (konac)			
– hrastovina	8 000 ... 900	– lipovina	500 ... 600
– javorovina	650 ... 750	– smrekovina	550 ... 600
– jelovina	550 ... 600	– topolovina	450 ... 500
Sipke tvari			
briketi:		sol	1 250
– ugljeni	750 ... 1 250	treset	300 ... 900
cement:		ugljen drveni od:	
– rastresen	1 200 ... 1 400	– mekanog drveta	150
– nabijen	1 900 ... 2 000	– tvrdog drveta	200
drvo u cjepanicama	330 ... 520	ugljen:	
koks	320 ... 450	– kameni	800 ... 900
tvari za nasipavanje:		– smeđi	700 ... 800
šljunak		vapnenac	1 400
– suh	1 700	vapno:	
– vlažan	2 000	– gašeno	1 150 ... 1 250
troska (šljaka)	1 000	– živo	1 060
zemlja, pijesak, ilovača		zemlja	1 600 ... 2 000
– mokra	2 100	žito, krumpir, voće, brašno, rastreseno	500
– prirodno vlažna	1 800	ječam	650
– suha	1 600	krumpir	750
pijesak, ljevaonički:		pšenica	760
– rastresen	1 200	raž	680
– nabijen	1 650	voće	360
slama	45	zob	550
snijeg:			
– svježe zapao	80 ... 190		
– mokar	200 ... 800		

Kutovi prirodnog nasipa

cement	40°	pšenica, raž	25 ... 35°
grah, grašak	35°	ugljen:	
ječam, zob	40 ... 45°	– kameni	45°
koks	35 ... 50°	– smeđi	35 ... 50°
		zemlja	27 ... 35°

Sila

Sila F (N) je uzrok promjeni gibanja i oblika tijela. Sila je vektor određen veličinom, smjerom i hvatištem.



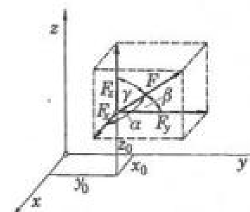
Sila u ravnini

F sila s hvatištem (x_0, y_0)
F_x, F_y komponente
α kut što ga zatvara smjer sile F s osi x

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_x + \boldsymbol{F}_y$$

$$F_x = F\cos\alpha \quad F_y = F\sin\alpha$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \qquad \tan\alpha = F_y / F_x .$$



Sila u prostoru

F sila s hvatištem (x_0, y_0, z_0)
F_x, F_y, F_z komponente
α, β, γ kutovi što ih zatvara sila F s osima x, y, z

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_x + \boldsymbol{F}_y + \boldsymbol{F}_z$$

$$F_x = F\cos\alpha \quad F_y = F\cos\beta \quad F_z = F\cos\gamma$$

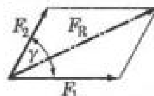
$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1.$$

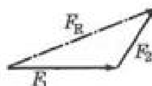
Sastavljanje dviju sila u ravnini

Sile koje sastavljamo:	F_1, F_2	komponente
Kut među silama:	γ	
Ukupna sila:	F_R	rezultanta

Grafičko rješenje:



paralelogram sila



trokut sila

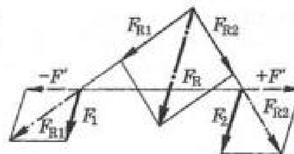
Analitičko rješenje: $\boldsymbol{F}_R = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 = \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Ry}^2}$

$$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2\,F_1\,F_2\cos\gamma}$$

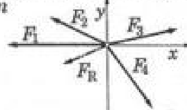
F_{Rx} i F_{Ry} su projekcije rezultanate F_R na osi x i y

$$F_{Rx} = F_1 + F_2\cos\gamma \quad F_{Ry} = F_2\sin\gamma.$$

Pri sastavljanju dviju paralelnih sila F_1 i F_2 dodaju se dvije jednake, ali suprotno usmjerene sile $+F'$ i $-F'$.



Sastavljanje više sila sa zajedničkim hvatištem



Analitičko rješenje: $\boldsymbol{F}_R = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{F}_i$

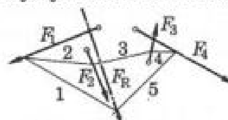
Grafičko rješenje: poligon sila

Projekcija rezultante na os x (y) jednaka je zbroju projekcija svih komponenata na os x (y):

$$F_{Rx} = \sum_{i=1}^{n} F_{ix} \qquad F_{Ry} = \sum_{i=1}^{n} F_{iy} \qquad F_R = \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Ry}^2}$$

Hvatište rezultante je u hvatištu sila.

Sastavljanje više sila s različitim hvatištima u ravnini



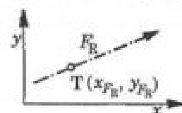
Analitičko rješenje: $\boldsymbol{F}_R = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{F}_i$

Grafičko rješenje: verižni poligon (0 – po želji odabrani pol)

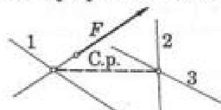
Daljnje rješavanje – pomoću projekcija – kao u prethodnom primjeru.

Rezultanta prolazi kroz točku **T** (x_{F_R}, y_{F_R})

$$x_{F_R} = \frac{\sum x_i\,F_{iy}}{F_{Ry}} \qquad y_{F_R} = \frac{\sum y_i\,F_{ix}}{F_{Rx}}$$



Rastavljanje sile F u više komponenata koje se ne sijeku sve u istoj točki



Grafičko rješenje:

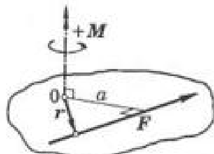


C.p. = Culmannov pravac spaja sjecište pravca djelovanja sile F i jednog od zadanih pravaca sa sjecištem ostalih dvaju pravaca.

Statički moment sile

Statički moment sile $\boldsymbol{M}$ ($[M]$ = N/m) s obzirom na neku točku (pol 0) je vektor, koji je jednak vektorskom umnošku vektoru položaja $\boldsymbol{r}$ i sile $\boldsymbol{F}$.

Vektor momenta



$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}, \qquad M = r\,F$$

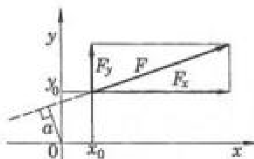
je usmjeren po »pravilu desnog vijka«. Vektor položaja počinje u točki 0 i završava u proizvoljnoj točki T na pravcu sile $\boldsymbol{F}$.

Prema dogovoru moment je pozitivan ako njegovo djelovanje ima smisao suprotan smislu kazaljke na satu.

Moment sile je vektor, kojemu je smjer okomit na ravninu, određenu smjerom sile i kraka. Vektor momenta sile ima takav smisao da je moment, gledan u suprotnom smislu, pozitivan.

Moment sile u ravnini

Za momentnu točku (pol 0) u koordinatnom ishodištu moment sile F izražen je:



$$M_0 = M_z = x_0\,F_y - y_0\,F_z = -F\,a.$$

U ravnini (x, y) je dogovorno moment pozitivan, ako je njegovo djelovanje usmjereno nasuprot gibanja kazaljke na satu. Za više sila njihov moment za istu točku je:

$$M_{F_R} = \sum_{i=1}^{n} M_i = \sum_{i=1}^{n} (x_i\,F_{iy} - y_i\,F_{ix}).$$

Moment sile u prostoru

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}$$

Projekcija momenta na koordinatne osi (x, y, z) su istodobno momenti sile oko istih koordinantnih osi:

$$M_x = y\,F_z - z\,F_y \quad M_y = z\,F_x - x\,F_z \quad M_z = x\,F_y - y\,F_z$$

$$|\boldsymbol{M}| = M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \qquad \boldsymbol{M} = M_x\,\boldsymbol{i} + M_y\,\boldsymbol{j} + M_z\,\boldsymbol{k}$$

Spreg sila (par sila) su dvije jednako velike, usporedne i suprotno usmjerene sile $\boldsymbol{F}$ i $-\boldsymbol{F}$ s međusobnim razmakom a. Te se dvije sile ne mogu sastaviti u rezultantu. Moment sprega sila iznosi



$$M = F\,a.$$

Spreg sila može se u istoj ili paralelnoj ravnini po volji premještati ili zamijeniti drugim spregom sila koji ima isti moment.

Ravnoteža sila

Sile su u ravnoteži ako kruto tijelo, na kojeg djeluju, ostaje u mirovanju (odnosno ne mijenja stanje gibanja).

Uvjeti ravnoteže:

a) Rezultanta svih sila mora biti jednaka ništici:

$$\boldsymbol{F}_R = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{F}_i = 0.$$

Stoga moraju biti i rezultante komponenata jednake ništici:

$$F_{Rx} = \sum_{i=1}^{n} F_{ix} = 0 \qquad F_{Ry} = \sum_{i=1}^{n} F_{iy} = 0 \qquad F_{Rz} = \sum_{i=1}^{n} F_{iz} = 0.$$

Pri grafičkom rješavanju poligon sila mora biti zatvoren ($\boldsymbol{F}_R = 0$).

b) Zbroj svih momenata mora biti jednak ništici:

$$\boldsymbol{M}_{F_R} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{M}_i = 0.$$

Zato moraju zbrojevi momenata s obzirom na pojedine koordinatne osi također biti jednaki ništici:

$$M_{F_{Rx}} = \sum_{i=1}^{n} M_{ix} = 0 \qquad M_{F_{Ry}} = \sum_{i=1}^{n} M_{iy} = 0 \qquad M_{F_{Rz}} = \sum_{i=1}^{n} M_{iz} = 0.$$

Ako se sve sile (uključujući i reakcije veza) sijeku u jednoj točki nije potrebno postavljati uvjete ravnoteže momenata.

Stabilnost

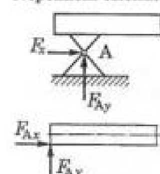
Tijelo je stabilno s obzirom na prevrtanje ako je:

Σ momenata stabilnosti > Σ momenata prevrtanja.

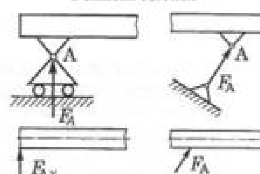
Pri tome računamo sve momente s obzirom na brid prevrtanja.

Reakcije u osloncima

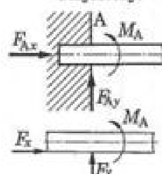
Nepomični oslonac



Pomični oslonac



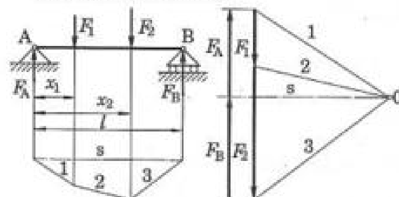
Uklještenje



U pomičnom osloncu smjer sile reakcije uvijek je okomit na smjer pomaka.

Nosači

Nosač na dva oslonca

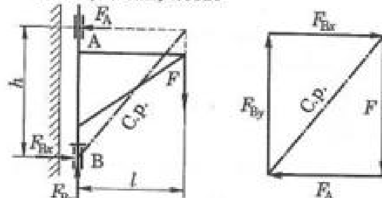


Reakcije u osloncima:

$$F_A = F_1 \frac{l - x_1}{l} + F_2 \frac{l - x_2}{l}$$

$$F_B = F_1 \frac{x_1}{l} + F_2 \frac{x_2}{l}.$$

Zidni (okretni) nosač



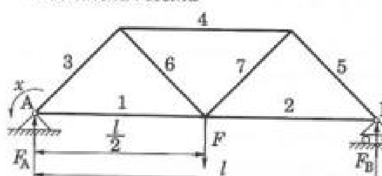
Reakcije u osloncima:

$$F_{Ax} = F_{Bx} = F \frac{l}{h}$$

$$F_{Ay} = F$$

(C.p. = Culmannov pravac)

Ravninska rešetka



Statička određenost:

$2v = p + n$

gdje su:

- v broj čvorova
- p broj štapova
- n broj nepoznatih reakcija veza.



Reakcije u osloncima:

$$F_A = F_B = \frac{F}{2}$$

Cremonin plan sastavljen je od (zatvorenih) poligona sila koje djeluju u svakom čvoru, a nalaze se u ravnoteži.

Najprije određujemo reakcije u osloncima A i B. Zatim crtamo plan tako da kod svih čvorova uzimamo u obzir redoslijed sila kakav je na slici, pri čemu treba usvojiti isti smisao gledanja (npr. x).

Statika užeta

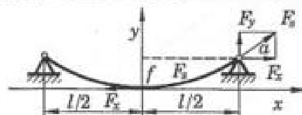
Uže obješeno na razmaku l s provjesom f. Težna sila po jedinici duljine

$q = A \varrho g \quad [q] = \text{N/m}$

A (ukupni) presjek užeta

ϱ gustoća tvari užeta

g težno ubrzanje (= 9,81 m/s²).



1. Maleni provjes ($f < l/10$)

Uže će poprimiti (dovoljnom točnošću) oblik parabole

$$y \approx \frac{4f}{l^2} x^2 = 4f\,(y/l)^2$$

Duljina užeta: $2s \approx l + \frac{8}{3}\frac{f^2}{l}$ — Težna sila užeta: $F_g \approx q\,l$

Provjes: $f \approx q\,l^2/8\,F_x$ — Prikloni kut: $\tan\alpha \approx 4\,f/l$

Sile u užetu: komponente $F_y \approx q\,l/2$ — $F_x \approx q\,l^2/8f$

rezultanta $F_s \approx q\,l/8 \cdot \sqrt{(l/f)^2 + 16}$.

2. Proizvoljni provjes

Uže će poprimiti oblik lančanice

$$y = h/2 \cdot (e^{x/h} + e^{-x/h}) - h \qquad h = F_x/p \approx l^2/8f$$

Duljina užeta: $2s = 2\sqrt{f^2 + 2fh}$ — Težna sila užeta: $F_g = 2\,q\,s$

Provjes: $f = h/2 \cdot (e^{l/2h} + e^{-l/2h}) - h$ — Prikloni kut: $\tan\alpha = s/h$

Sile u užetu: komponente $F_y = q\,s$ — $F_x = q\,h$

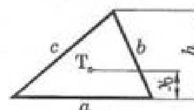
rezultanta $F_s = q\,(f + h)$.

TEŽIŠTA

Težišta homogenih krivulja

1. Duljina. Težište je na polovici duljine.
2. Opseg trokuta

$$y_0 = \frac{h}{2} \cdot \frac{b + c}{a + b + c}.$$



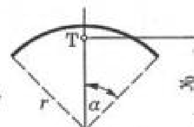
3. Kružni luk s polumjerom r i kutom α

$$y_0 = r\,\frac{\sin\alpha}{\hat{\alpha}} \qquad [\hat{\alpha}] = \text{rad}$$

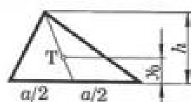
$\alpha = \pi/2 = 90°$ — $y_0 = 2\,r/\pi \approx 0{,}636\,6\,r$

$\alpha = \pi/4 = 45°$ — $y_0 = 2\,r/\pi \cdot \sqrt{2} \approx 0{,}900\,3\,r$

$\alpha = \pi/6 = 30°$ — $y_0 = 3\,r/\pi \approx 0{,}954\,9\,r.$



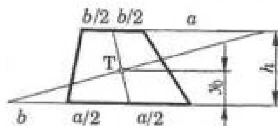
Težišta likova



1. Trokut

$$y_0 = \frac{h}{3}.$$

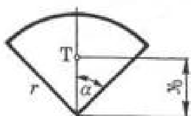
2. Paralelogram. Težište je u sjecištu dijagonala.



3. Trapez

$$y_0 = \frac{h}{3} \cdot \frac{a + 2b}{a + b}.$$

4. Pravilni višekutnik i krug. Težište je u središtu.



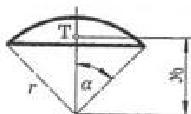
5. Kružni isječak

$$y_0 = \frac{2}{3}\, r\, \frac{\sin \alpha}{\hat{\alpha}} \qquad [\hat{\alpha}] = \text{rad}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad y_0 = \frac{4\,r}{3\,\pi} \quad \approx 0{,}424\,4\, r$$

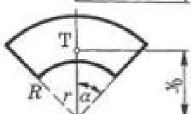
$$\alpha = \frac{\pi}{4} = 45^\circ \quad y_0 = \frac{4\sqrt{2}}{3\,\pi}\, r \approx 0{,}600\,2\, r$$

$$\alpha = \frac{\pi}{6} = 30^\circ \quad y_0 = \frac{2\,r}{\pi} \quad \approx 0{,}636\,6\, r$$



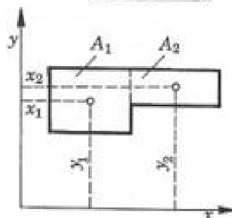
6. Kružni odsječak

$$y_0 = \frac{2}{3}\, r\, \frac{\sin^3 \alpha}{\hat{\alpha} - \sin \alpha \cos \alpha} \qquad [\hat{\alpha}] = \text{rad}$$



7. Isječak kružnog vijenca

$$y_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \cdot \frac{\sin \alpha}{\hat{\alpha}} \qquad [\hat{\alpha}] = \text{rad}$$



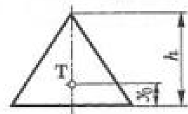
8. Sastavljeni lik
Površine sastavnih dijelova lika
$A_1, A_2, \ldots, A_i$
koordinate težišta

$$x_0 = \sum_{i=1}^{n} (A_i\, x_i)/A \qquad A = \sum_{i=1}^{n} A_i$$

$$y_0 = \sum_{i=1}^{n} (A_i\, y_i)/A$$

Težišta tijela

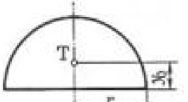
1. Kocka i prizma. Težište je u središtu.



2. Piramida i stožac

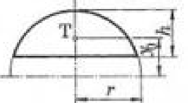
$$y_0 = \frac{h}{4}.$$

3. Kugla. Težište je u središtu.



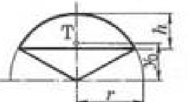
4. Polukugla

$$y_0 = \frac{3}{8}\, r.$$



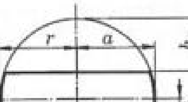
5. Kuglin odsječak (kalota)

$$y_0 = \frac{3}{4} \cdot \frac{(2\,r - h)^2}{(3\,r - h)}.$$



6. Kuglin isječak

$$y_0 = \frac{3}{8}\,(2r - h).$$



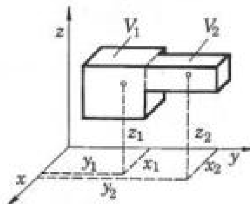
7. Kuglin pojas

$$y_0 = \frac{-3\,(a^4 - b^4)}{6\,h\,(a^2 + b^2) + 2\,h^3}$$

$$a = \sqrt{h_a\,(2\,r - h_a)} \qquad b = \sqrt{h_b\,(2\,r - h_b)}.$$



8. Sastavljeno tijelo.
Pojedini obujmi V_i
koordinate težišta.



$$x_0 = \sum_{i=1}^{n} (V_i\, x_i)/V$$

$$y_0 = \sum_{i=1}^{n} (V_i\, y_i)/V \qquad V = \sum_{i=1}^{n} V_i$$

$$z_0 = \sum_{i=1}^{n} (V_i\, z_i)/V.$$

TRENJE

Trenje je otpor pri klizanju dvaju tijela u dodiru. Sila trenja F_t ovisi o hrapavosti i tvari kliznih površina, načinu podmazivanja i o normalnoj (pravokutnoj) sili F_n, kojom jedna površina tlači na drugu.

1. Trenje u mirovanju

Sila trenja $F_t = \mu_0 F_n$ μ_0 faktor trenja mirovanja.

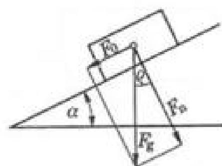
2. Trenje u gibanju

Sila trenja $F_t = \mu F_n$ μ faktor trenja gibanja.

3. Faktori trenja

Parovi tvari	μ_0		μ	
	suho	podmazano	suho	podmazano
čelik na čelik	0,12 ... 0,30	0,10	0,10	0,01 ... 0,05
čelik na lijevano željezo ili broncu	0,19 ... 0,20	0,10	0,18	0,01 ... 0,05
kovina na drvo	0,50 ... 0,65	0,10	0,20 ... 0,50	0,02 ... 0,10
drvo na drvo	0,40 ... 0,65	0,16 ... 0,20	0,20 ... 0,40	0,04 ... 0,16
koža na kovinu	0,60	0,20	0,22	0,12
koža na lijevano željezo	0,56	–	0,28	0,12

Faktor trenja μ za gumeni kotač na dobroj cesti (asfalt, beton): suho: 0,5 ... 0,65; vlažno: 0,2 ... 0,35; snijeg: 0,1 ... 0,5; led: 0,05 ... 0,15.



4. Trenje tijela na kosini

Sila okomita na podlogu

$F_n = F_g \cos\alpha$ F_g težna sila.

Sila u smjeru podloge (niz kosinu)

$F_0 = F_g \sin\alpha$.

Tijelo miruje – zbog trenja – u svakom položaju kosine ako je:

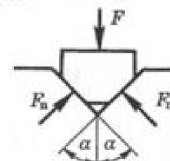
$F_t \geq F_0$ $\mu_0 \geq \tan\alpha$ $\varrho_0 \geq \alpha$ $F_t = \mu_0 F_n = \mu_0 F_g \cos\alpha$.

Kut trenja: $\tan\varrho_0 = \mu_0$ ϱ_0 kut trenja u mirovanju

$\tan\varrho = \mu$ ϱ kut trenja u gibanju.

5. Trenje u klinastom utoru pri djelovanju sile F na klin

$$F = 2\,F_n \sin\alpha.$$



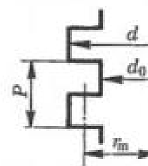
Trenje mirovanja:

$$F_t = \mu_0\, 2\,F_n = \frac{\mu_0}{\sin\alpha} F = \mu_0' F.$$

Faktor trenja klina $\mu_0' = \mu_0/\sin\alpha$.

6. Trenje vijka

a) Vijak s plosnatim navojem



Srednji polumjer: $r_m = \dfrac{d + d_0}{4}$.

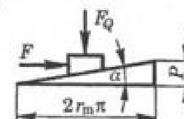
Kut uspona α: $\tan\alpha = \dfrac{P}{2\,r_m\,\pi}$.

Faktor trenja: $\tan\varrho = \mu$.

Djelovanje vijka nasuprot sili opterećenja F_Q:

Sila gibanja bez trenja

$$F_0 = F_Q \tan\alpha.$$



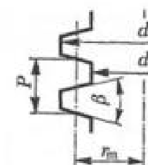
Sila gibanja s trenjem

$$F = F_Q \tan(\alpha + \varrho) = F_Q \frac{P + 2\,r_m\,\pi\mu}{2\,r_m\,\pi - \mu\,P}.$$

Korisnost: $\eta = F_0/F = \tan\alpha/\tan(\alpha + \varrho)$

Sila samokočnosti: $F' = F_Q \tan(\alpha - \varrho_0)$

Uvjet samokočnosti vijka: $\alpha \leq \varrho_0$.



b) Vijak s trapeznim navojem

Faktor trenja $\mu' = \mu/\cos(\beta/2)$

Sav ostali proračun trenja isti je kao i za vijak s plosnatim navojem.

7. Trenje u kliznom ležaju u kojem djeluje sila F na površinu A

tlak $p = F/A$.

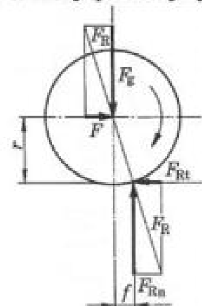
Moment trenja za radijalni ležaj promjera d (polumjera r) i duljine l

$M = \mu\,r\,F$ $p = F/l\,d$

za aksijalni ležaj s polumjerom rukavca r i polumjerom otvora u ležaju r_0

$M = 2/3 \cdot \mu\,p\,\pi\,(r^3 - r_0^3)$ $p = F/\pi(r^2 - r_0^2)$.

8. Trenje pri kotrljanju



Kotač (kolut, kugla, valjak), opterećen silom (npr. težnom silom F_g), kotrlja se po ravnoj podlozi zbog sile kotrljanja F koja na nj djeluje odnosno zbog momenta kotrljanja M.

Hvatište (prema središtu kola uperene) sile otpora F_R pomaknuto je za krak f pred kotačem.

Komponete sile otpora F_R: $F_{Rn} = F_g \quad F_{Rt} = F$

Trenje kotrljanja: $f/r = F_{Rt}/F_{Rn} = F/F_g$

Sila kotrljanja i moment: $F = f/r \cdot F_g \; M = f\,F_g$.

Kotrljanje počinje samo pri nagibu podloge $\tan \alpha > f/r$.

Pri kotrljanju zbog momenta kotrljanja M mora biti faktor trenja između kotača i podloge (tračnice, ceste) $\mu > f/r$.

Krak momenta kotrljanja f:

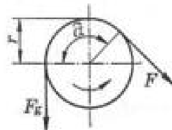
- kaljena čelična tijela (kugle, valjci) na čeličnoj podlozi (kotrljajući ležaji) $f \approx 0{,}01$ mm
- čelik, čelični lijev ili sivi lijev na čeliku (vozila na tračnicama) $f \approx 0{,}5$ mm
- drvo na drvetu $f \approx 5{,}0$ mm.

Trenje kotrljanja f/r za gumene kotače na cesti (motorna vozila): asfalt $\approx 0{,}01$; beton $\approx 0{,}015$; makadam $\approx 0{,}03$; pijesak do 0,3.

9. Kolutno obodno trenje

Trenje užeta ili trake na obodu koluta.

Obuhvatni kut $\hat{\alpha} = 180/\pi \cdot \alpha°$ $\quad [\hat{\alpha}] =$ rad



a) Trenje na užnici $F > F_g$

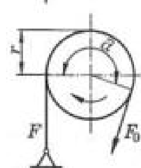
$F = F_g\, e^{\mu\hat{\alpha}}$.

Obodna tarna sila

$F_t = F - F_g = F_g\,(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1) = F(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1)/e^{\mu\hat{\alpha}}$.

Tarni moment

$M_t = F_t\, r = F_g\, r\,(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1)$.



b) Trenje na bubnju koluta $F > F_0$

Tarna sila

$F_t = F - F_0 = F_0\,(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1)$.

Tarni moment

$M_t = F_t\, r = F_0\, r\,(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1)$.

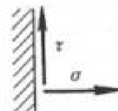
ČVRSTOĆA

Naprezanja

Pri deformacijama nastaju u tvarima naprezanja koja djeluju suprotno uzroku deformacija:

- normalne sile F_n djeluju okomito ili normalno na presjek S, i uzrokuju *normalno naprezanje* σ

$$\sigma = F_n/S \qquad \sigma = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta F}{\Delta S}$$



- tangencijalna sila F_t djeluje u presjeku S i uzrokuje *posmično (tangencijalno) naprezanje* τ

$$\tau = F_t/S.$$

a) Normalno naprezanje σ uzrokuje produljenje ili skraćenje tvari (npr. pri vlaku ili tlaku). Pritom se pojavljuje

produljenje $\Delta l = l - l_0$ $\quad$ relativno produljenje $\varepsilon = \Delta l/l_0$

suženje $\Delta d = d_0 - d$ $\quad$ relelativno suženje $\varepsilon_q = \Delta d/d_0$

l_0, d_0 početna duljina odnosno promjer epruvete (bez naprezanja),

l, d duljina i promjer epruvete pri naprezanju σ.

$\varepsilon/\varepsilon_q = m$ $\qquad$ Poissonov broj $\mu = 1/m$

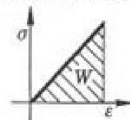
za kovine $m = 3 \dots 4$ (za čelik: 10/3)

za sivi lijev$m = 5 \dots 9$.

Hookeov zakon vrijedi ako je rastezanje linearno proporcionalno naprezanju:

$\varepsilon = \alpha\,\sigma$ $\qquad \alpha$ $\quad$ rastezljivost

$\sigma = \varepsilon\,E$ $\qquad E = 1/\alpha$ $\quad$ modul elastičnosti.



Hookeov zakon vrijedi (do granice linearne proporcionalnosti) za čelik, a praktično i za bakar, aluminij i drvo.

Deformacijski rad $\qquad W = \sigma\,\varepsilon/2$.

Potencijski zakon (ustanovljen na temelju preciznih mjerenja) $\varepsilon = \alpha_0\,\sigma^n$ vrijedi osobito za sivi lijev, gdje je $\alpha_0 \approx 1/E$ dok je $n = 1{,}08$ za vlak a $n = 1{,}04$ za tlak. Za neke druge tvari je npr.

$n > 1$ za lijevani cink, granit, beton ($n = 1{,}14 \dots 1{,}16$)

$n < 1$ za kožu ($n = 0{,}7$), užad od konoplje itd.

Modul elastičnosti E za neke tvari

Tvar	Modul elastičnosti E / N/mm²	Tvar	Modul elastičnosti E / N/mm²
čelik	210 000	Al i Al-slitine	≈ 70 000
čelični lijev	200 000	Mg i Mg-slitine	≈ 39 000
nodularni lijev	≈ 180 000	bakar	125 000
sivi lijev	≈ 100 000	mjed	≈ 90 000
karbidne tvrde kovine	≈ 580 000	drvo	≈ 10 000

b) Posmična (tangencijalna) naprezanja τ uzrok su klizanju tvari (npr. kod smicanja). Pri tom se pojavljuje kutna deformacija γ. Slično Hookeovu zakonu vrijedi za područje u kojem je tangencijalno naprezanje τ linearno proporcionalno klizanje (deformacija γ):

$\gamma = \beta\,\tau$ β smičnost

$\tau = \gamma\, G$ $G = 1/\beta$ modul smičnosti.

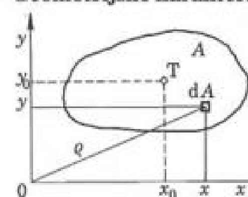
Deformacijski rad $W = \tau\,\gamma/2$.

Odnos između modula elastičnosti E i modula smičnosti G

$$G = E\,m/2\,(m+1) = E/2\,(1+\mu)$$

(Za čelik je $m = 10/3$ pa je $G = 0{,}385\,E$.)

Geometrijske karakteristike presjeka



Statički je moment presjeka s obzirom na neku os zbroj umnožaka elementarnih površina te plohe i udaljenosti njihovih težišta od izabrane osi npr. od osi x

$$S_x = \int y\,\mathrm{d}A \approx \Sigma\, y_i\, A_i$$

a jednak je umnošku površine S i udaljenosti y_0 njena težišta T od osi x

$$S_x = y_0\, A.$$

Statički je moment presjeka s obzirom na os kroz težište ništica.

Moment tromosti presjeka

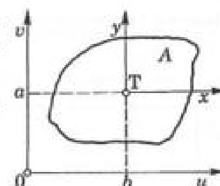
Aksijalni moment presjeka je zbroj umnožaka elementarnih ploština i kvadrata udaljenosti njihovih težišta od izabrane osi, npr. od osi x ili y.:

$$I_x = \int y^2\,\mathrm{d}A \approx \Sigma\, y_i^2\, A_i \qquad I_y = \int x^2\,\mathrm{d}A \approx \Sigma\, x_i^2\, A_i$$

Polumjer tromosti $i = \sqrt{I/A}$.

Polarni moment presjeka je zbroj umnožaka elementarnih ploština i kvadrata udaljenosti njihovih težišta od izabranog pola (0)

$$I_p = \int \varrho^2\,\mathrm{d}A \approx \Sigma\, \varrho_i^2\, A_i$$



Pritom vrijedi $\varrho^2 = x^2 + y^2$ i $I_p = I_x + I_y$

Moment tromosti presjeka uvijek je pozitivan.

Steinerovo pravilo

Aksijalni je moment tromosti presjeka s obzirom na os koja je paralelna s osi kroz težište

$$I_u = I_x + a^2 A \qquad I_v = I_y + b^2 A.$$

Vlak i tlak

Opterećenje F, jednolično podijeljeno po presjeku S, uzrokuje naprezanje



pri vlaku $+\sigma = \dfrac{F}{A}$

pri tlaku $-\sigma = -\dfrac{F}{A}$

Deformacija kod vlaka (tlaka) – produljenje (skraćenje) $\Delta l = \sigma l/E$.

Toplinsko naprezanje σ_T pojavljuje se pri zagrijavanju ili hlađenju čvrsto upeta predmeta

$$\sigma_T = \varepsilon\, E = E \cdot \Delta l/l_0$$

Δl je linearno toplinsko produljenje (skraćenje) (v. str. 187)

$$\Delta l = \alpha_l\, l_0 \cdot \Delta T$$

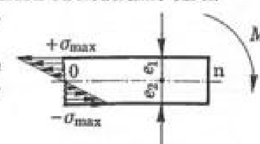
gdje su: l_0 početna duljina, ΔT temperaturna razlika, α_l koeficijent toplinskog rastezanja ($[\alpha_l] = \mathrm{K}^{-1}$) (v. str. 188 i 189)

$$\sigma_T = E\,\alpha_l \cdot \Delta T.$$

Toplinska naprezanja ne zavise od izmjera predmeta i mogu biti katkada vrlo velika.

Savijanje

Moment savijanja M uzrokuje naprezanje σ, koje zamišljamo raspodijeljeno po presjeku razmjerno prema udaljenosti od neutralne osi n.



Neutralna os prolazi kroz težište promatranog presjeka (na slici: kroz točku 0).

Maksimalno naprezanje na savijanje σ_{max} pojavljuje se u točki koja je najudaljenija od neutralne osi (za e_1, e_2) ono je

$$+\sigma_{max} = M e_1/I \qquad -\sigma_{max} = M e_2/I.$$

Ako je presjek simetričan s obzirom na os n ($e_1 = e_2 = e$), vrijedi

$$\sigma_{max} = M e/I = M/W.$$

I moment presjeka A s obzirom na os n, W moment otpora $W = I/e$.

Progib nosača f izlazi iz diferencijalne jednadžbe elastične linije

$$y'' = -M/EI.$$

M_{max}, f, I, W za najčešće slučajeve predočeni su na str. 142 i 143.

Momenti i progibi nosača

Slika opterećenja	Moment savijanja M_{max}	Opasni presjek	Progib f	Progib na mjestu
	$F\,l$	B	$\frac{F}{E\,I}\cdot\frac{l^3}{3}$	A ($x = 0$)
	$\frac{F\,l}{4}$	C	$\frac{F}{E\,I}\cdot\frac{l^3}{48}$	C ($x = l/2$)
	$\frac{F\,a\,b}{l}$	C	$\frac{F}{E\,I}\cdot\frac{a^2\,b^2}{3\,l}\cdot\frac{l+b}{3\,b}\sqrt{\frac{l+b}{3\,a}}$	$x = a\sqrt{\frac{l+b}{3\,a}}$ za $a > b$
	$\frac{3\,F\,l}{16}$	B	$\frac{F}{E\,I}\cdot\frac{l^3}{48\sqrt{5}}$	$x = \frac{l}{\sqrt{5}}$
	$\frac{F\,l}{8}$	A B C	$\frac{F}{E\,I}\cdot\frac{l^3}{192}$	C ($x = l/2$)
	$\frac{q\,l^2}{2}$	B	$\frac{q}{E\,I}\cdot\frac{l^4}{8}$	A ($x = 0$)
	$\frac{q\,l^2}{8}$	C	$\frac{5}{384}\cdot\frac{q\,l^4}{E\,I}$	C ($x = l/2$)
	(–) $\frac{q\,l^2}{8}$	B	$\frac{q}{E\,I}\cdot\frac{l^4}{185}$	$x = 0{,}421\,5\,l$
	(–) $\frac{q\,l^2}{12}$	A B	$\frac{q}{E\,I}\cdot\frac{l^4}{384}$	C ($x = l/2$)

Momenti presjeka I_x i momenti otpora W_x

Presjek	I_x	W_x
	$\frac{a\,h^3}{12}$	$\frac{a\,h^2}{6}$
	$\frac{a^4}{12}$	$\frac{a^3}{6}$
$e = 2\,h/3$	$\frac{b\,h^3}{36}$	$\frac{b\,h^2}{24}$
	$\frac{5}{16}\sqrt{3}\cdot r^4 = 0{,}5413\ r^4$	$\frac{5}{8}\,r^3$
	$\frac{\pi\,d^4}{64}$	$\frac{\pi\,d^3}{32} \approx 0{,}1\ d^3$
$e = \frac{(3-4/\pi)\,d}{6} = 0{,}288\,d$	$\frac{\left(\frac{\pi}{8}-\frac{8}{9\,\pi}\right)}{(16\cdot d^4)} = 0{,}006\ 86\ d^4$	$0{,}023\,8\ d^3$
	$\frac{\pi}{64}\,(D^4 - d^4)$	$\frac{\pi}{32}\cdot\frac{D^4-d^4}{D} \approx 0{,}1\,\frac{D^4-d^4}{D}$
Za tanke stijenke $s = (D-d)/2$ $r = (D+d)/2$	$\approx \pi\,s\,r^3$	$\approx \pi\,s\,r^2$
	$\frac{\pi\,a\,b^3}{4}$	$\frac{\pi\,a\,b^2}{4}$

Momente presjeka i momente otpora za normirane čelične profile vidi u poglavlju: Oblici kovinskih poluproizvoda (str. 426 ... 430).

Smik (odrez)

Poprečna sila F, koja djeluje u samom presjeku, a zamišljena je jednolično raspodijeljenom po presjeku A, uzrokuje posmično naprezanje

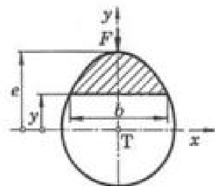
$$\tau_s = F/A.$$

Posmična naprezanja uvijek su vezana s naprezanjem na savijanje.

U kratkih svornjaka i zakovica može se naprezanje na savijanje zanemariti i računati samo na smik.

Ako istodobno u presjeku djeluju poprečna sila i moment savijanja, posmična naprezanja su nejednolično raspodijeljena po presjeku. Najčešće po zakonu parabole. Na primjer, ako poprečna sila F djeluje u osi simetrije presjeka, posmično je naprezanje na udaljenosti y od neutralne osi:

$$\tau = \frac{F\,S_x}{b\,I_x},$$



gdje su: S_x statički moment šrafiranog dijela presjeka (iznad y) oko osi x, b širina presjeka na udaljenosti y od neutralne osi, I_x moment tromosti cijelog presjeka.

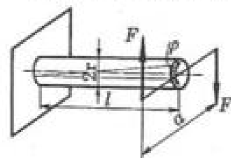
Najveće posmično naprezanje nastaje pri:

- pravokutnom presjeku $\tau_{s\,max} = (3/2) \cdot F/A$
- okruglom presjeku $\tau_{s\,max} = (4/3) \cdot F/A$
- okruglom prstenu s tankom stijenkom. $\tau_{s\,max} \approx 2F/A$.

Uvijanje (torzija)

Moment uvijanja (torzije) M_t:

$$M_t = F\,a,$$



uzrokuje u presjeku posmično naprezanje. Najveće je posmično naprezanje:

$$\tau_{t\,max} = M_t \,/\, W_t\,,$$

W_t je torzijski moment otpora.

Kut uvijanja $\hat{\varphi}$: $\hat{\varphi} = M_t\,l \,/\, (G\,I_t)$, $[\hat{\varphi}]$ = rad.

I_t je torzijski moment uvijanja.

Relativni kut uvijanja $\hat{\vartheta}$

$$\hat{\vartheta} = \frac{d\,\hat{\varphi}}{d\,x} = \frac{M_t}{G\,I_t}.$$

Torzijski moment otpora W_t i relativni kut uvijanja predočene su na str. 145.

Torzijski momenti otpora i relativni kut uvijanja

Presjek	Torzijski moment otpora W_t	Relativni kut uvijanja $\frac{\hat{\vartheta}}{\text{rad/m}}$
	$\frac{\pi}{16} \cdot d^3$	$\frac{32}{\pi\,d^4} \cdot \frac{M_t}{G}$
	$\frac{\pi}{16} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}$	$\frac{32}{\pi\,(D^4 - d^4)} \cdot \frac{M_t}{G}$
Za tanke stijenke $s = (D - d)/2$ $r = (D + d)/2$	$\approx 2\,\pi\,s\,r^2$	$\approx \frac{1}{2\,\pi\,s\,r^3} \cdot \frac{M_t}{G}$
	$\frac{\pi}{2} \cdot a\,b^2$	$\frac{1}{\pi} \cdot \frac{a^2 + b^2}{a^3\,b^3} \cdot \frac{M_t}{G}$
2)	0,208 a^3	$\frac{7{,}11}{a^4} \cdot \frac{M_t}{G}$

Napomena: 1) $\tau_{t\,max}$ je u točki 1; u točki 2 je $\tau_{t2} = \tau_{t\,max}\,\frac{a}{b}$.

Napomena: 2) $\tau_{t\,max}$ je u sredini stranice lika (točka 1); u kutu (točka 2) je $\tau_t = 0$.

Torzijski momenti otpora i relativni kut uvijanja (*konac*)

Presjek	Torzijski moment otpora W_t	Relativni kut uvijanja $\frac{\hat{\vartheta}}{rad/m}$
3)	$\frac{c_1}{c_2} \cdot a\, b^2$	$\frac{1}{c_1\, a\, b^3} \cdot \frac{M_t}{G}$
	$c_1 = \frac{1}{3}\left(1 - \frac{0{,}630}{n} + \frac{0{,}052}{n^5}\right)$ $c_2 = 1 - \frac{0{,}65}{1 + n^3}$ $n = \frac{a}{b}$	
4)	$2\, A_{med} s_{min}$ za $s = \text{const}$ je $2\, A_{med} s$	$\frac{M_t}{4\, A_{med}\, G} \oint \frac{dl}{s}$ za $s = \text{const}$ je $\frac{M_t\, O}{4\, A_{med}\, G s}$
5)	$\frac{\eta}{3\, t_{max}} \Sigma (t_i^3\, h_i)$	$\frac{3\, M_t}{\eta\, G\, \Sigma (t_i^3\, h_i)}$

Profil	∟	□⊥	+	⊥
η	0,99	1,12	1,17	1,31

Napomena: 3) $\tau_{t\,max}$ je u točki 1; u kutu (točka 2) je $\tau_t = 0$.

Napomena: 4) A_{med} je ploština lika, koji je ograđen srednjom crtom l i ima opseg O. $\tau_{t\,max}$ je na mjestu, gdje je s_{min}

Napomena: 5) $\tau_{t\,max}$ je u sredini dulje stranice pravokutnika visine t_{max}

Opterećenje i progib opruga

σ normalno naprezanje
τ tangencijalno naprezanje
F opterećenje
f progib

$$F = \frac{b\, h^2}{6} \cdot \frac{\sigma}{l}$$

$$f = \frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{3} = \frac{4\, l^3}{b\, h^3} \cdot \frac{F}{E} = \frac{2\, l^2}{3\, h} \cdot \frac{\sigma}{E}$$

$$F = \frac{n\, b\, h^2}{6\, l}\, \sigma$$

$$f = \psi\, \frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{3} = \psi\, \frac{4\, l^3}{n\, b\, h^3} \cdot \frac{F}{E} = \psi \cdot \frac{2\, l^2}{3\, h} \cdot \frac{\sigma}{E}$$

n broj lamela

n	1	2	3	4	5	10	∞
ψ	1,000	1,160	1,234	1,283	1,315	1,390	1,500

$$F = \frac{b\, h^2}{6\, r}\, \sigma$$

$$f = r\, \hat{\varphi} = \frac{F}{EI} \cdot l\, r^2 = 12\, \frac{F}{E} \cdot \frac{l\, r^2}{b\, h^3} = 2\, \frac{l\, r}{h} \cdot \frac{\sigma}{E} \qquad [\hat{\varphi}] = \text{rad}$$

$$F \approx \frac{\pi}{16} \cdot \frac{d^3}{r} \cdot \tau$$

$$f \approx \frac{64\, n\, r^3}{d^4} \cdot \frac{F}{G} = \frac{32\, l\, r^2}{\pi\, d^4} \cdot \frac{F}{G} = \frac{4\, \pi\, n\, r^2}{d} \cdot \frac{\tau}{G} = \frac{2\, lr}{d} \cdot \frac{\tau}{G}$$

n broj zavoja opruge
l duljina žice opruge
(Te jednadžbe vrijede samo ako je promjer žice vrlo malen prema promjeru opruge!)

Izvijanje

Najmanja sila pri kojoj se pojavljuje izvijanje je sila izvijanja F_k. Djelovanje te sile na nosač presjeka A uzrokuje u njemu naprezanje izvijanja σ_k

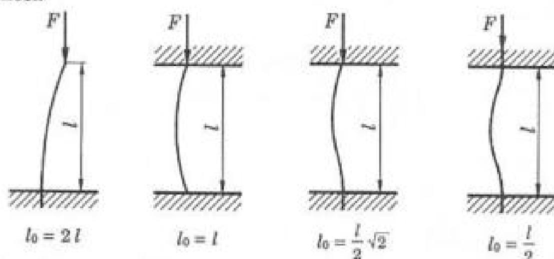
$$\sigma_k = \frac{F_k}{A}.$$

Sila izvijanja F_k i naprezanje izvijanja σ_k ovise o vitkosti λ

$$\lambda = \frac{l_0}{i}$$

gdje su: l_0 slobodna duljina izvijanja, i polumjer tromosti.

Slobodna duljina izvijanja l_0 za različite slučajeve opterećenja na izvijanje iznosi:



$l_0 = 2\,l$ $\quad$ $l_0 = l$ $\quad$ $l_0 = \frac{l}{2}\sqrt{2}$ $\quad$ $l_0 = \frac{l}{2}$

Polumjer tromosti i jest:

$$i = \sqrt{I_{min}/A}$$

gdje su: A presjek nosača, a I_{min} njegov najmanji aksijalni moment presjeka.

Eulerova jednadžba za elastično izvijanje

$$F_k = \pi^2 \, \frac{E\, I_{min}}{l_0^2}.$$

Odatle slijedi naprezanje σ_k za elastično izvijanje:

$$\sigma_k = \frac{F_k}{A} = \pi^2 \frac{E\, I_{min}}{l_0^2\, A} = \pi^2 \frac{E}{\lambda^2}.$$

Te dvije jednadžbe vrijede samo za elastično tlačno područje, tj. pri vitkosti čelika $\lambda > 105$.

Stvarnu silu F, kojom možemo opteretiti nosač, određujemo pomoću faktora sigurnosti ν

$$F = \frac{F_k}{\nu}.$$

Faktor sigurnosti ν iznosi za:

sivi lijev $\quad \nu = 8$
čelik $\quad \nu = 5$
drvo $\quad \nu = 6 \ldots 12.$

Tetmajerove jednadžbe za naprezanje σ_k pri neelastičnom izvijanju koji se rabe pri izradbi strojeva:

Tvar	E / N/mm²	σ_k / N/mm²	Vitkost λ
sivi lijev	100 000	$776 - 12{,}0\,\lambda + 0{,}053\,\lambda^2$	$\lambda < 80$
čelični lijev	200 000	$303 - 1{,}29\,\lambda$	$\lambda < 112$
čelik:			
– mekan	210 000	$310 - 1{,}14\,\lambda$	$\lambda < 105$
– tvrd	210 000	$335 - 0{,}62\,\lambda$	$\lambda < 89$
– Cr Ni	210 000	$470 - 2{,}30\,\lambda$	$\lambda < 86$
drvo	10 000	$29{,}3 - 0{,}194\,\lambda$	$\lambda < 100$

Dopušteno opterećenje $\quad F = \frac{F_k}{\nu} = \frac{\sigma_k\, A}{\nu},$

u strojarstvu obično iznosi u elastičnom području $\nu = 5 \ldots 10$, a u neelastičnom području $\nu = 3 \ldots 8$.

*

»Postupak ω« rabimo za čelične i drvene konstrukcije. U elastičnom području je pri faktoru izvijanja ω faktor sigurnosti $\nu = 2{,}5$, u neelastičnom području je $\nu = 1{,}5$.

Naprezanje u nosaču određujemo izrazom $\quad \sigma = \frac{F}{A}\,\omega \le \sigma_{dop},$

gdje je: A presjek nosača, F tlačna sila kojom je opterećen, σ naprezanje (normalno), ω faktor izvijanja ovisan o vitkosti λ i tvari nosača.

Faktor izvijanja ω

za čelik čvrstoće 360 N/mm² (ω_{360}) i 510 N/mm² (ω_{510}):

λ	0	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ω_{360}	1,00	1,04	1,08	1,14	1,21	1,30	1,41	1,55	1,71	1,90
ω_{510}	1,00	1,06	1,11	1,19	1,28	1,41	1,58	1,79	2,05	2,53
λ	110	120	130	140	160	180	200	220	240	250
ω_{360}	2,11	2,43	2,85	3,31	4,32	5,47	6,75	8,17	9,73	10,55
ω_{510}	3,06	3,65	4,28	4,96	6,48	8,21	10,13	12,26	14,59	15,83

za sivi lijev

λ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ω	1,00	1,01	1,05	1,11	1,22	1,39	1,67	2,21	3,50	4,43	5,45

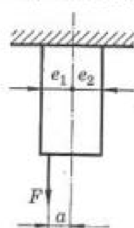
za drvo

λ	0	10	20	30	40	60	80	100	120	140	150
ω	1,01	1,01	1,03	1,08	1,14	1,42	2,07	3,22	4,64	6,31	7,25

Za čelične konstrukcije treba provjeriti stabilnost po postupku koji je propisan normom HRN U.E7. 081; uzimajući u obzir utjecaj oblik presjeka, geometrijske i druge nepravilnosti (imperfekcije) stupova.

Složena opterećenja

a) Vlak i savijanje



Nosač opterećen na vlak silom F koja djeluje na nj ekscentrično na udaljenosti a od osi nosača dodatno je opterećen momentom $M = F\,a$.

Naprezanje zbog vlaka: $\sigma = F/S$

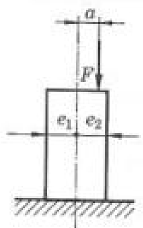
Najveće naprezanje zbog savijanja:

$$+\sigma_1 = M\,e_1/I = F\,a\,e_1/I$$
$$-\sigma_2 = -M\,e_2/I = -F\,a\,e_2/I$$

Najveća ukupna naprezanja:

$$\sigma_{r1} = \sigma + \sigma_1 = F/S + F\,a\,e_1/I$$
$$\sigma_{r2} = \sigma - \sigma_2 = F/S - F\,a\,e_2/I.$$

b) Tlak i savijanje



Tlačna sila F koja djeluje na nosač u udaljenosti a od osi nosača uzrokuje opterećenje na tlak i dodatno opterećenje momentom $M = F\,a$.

Naprezanja zbog tlaka: $-\sigma = -F/S$

Najveće naprezanje zbog savijanja:

$$+\sigma_1 = M\,e_1/I = F\,a\,e_1/I$$
$$-\sigma_2 = -M\,e_2/I = -F\,a\,e_2/I.$$

Najveća ukupna naprezanja:

$$\sigma_{r1} = -\sigma + \sigma_1 = -F/S + F\,a\,e_1/I$$
$$\sigma_{r2} = -\sigma - \sigma_2 = -F/S - F\,a\,e_2/I.$$

Vitke štapove (velika duljina i razmjerno malen presjek) treba provjeriti i na izvijanje.

*

Što se hvatište sile F više udaljuje od osi nosača, dakle što se udaljenost a povećava, to se više smanjuju tlačna naprezanja u rubu nosača koji je nasuprot hvatištu sile F. Ta tlačna naprezanja poprimaju konačnu vrijednost jednaku ništici kad a naraste do vrijednosti $a = I/(A\,e_1)$. Povećava li se udaljenost a iznad te vrijednosti, u suprotnom rubu nosača pojavit će se vlačna naprezanja. Sama tlačna naprezanja (npr. pri gradivima koja ne podnose vlačna naprezanja) dobivamo, ako sila djeluje na površini jezgre presjeka, koja je omeđena »polumjerom jezgre r«

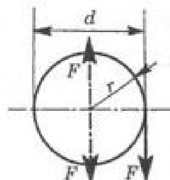
$$r = I/(A\,e_1).$$

Polumjer je jezgre r za različite nosače:

kvadratni (sa stranicom h)	– u smjeru stranice	$r = h/6$
	– u smjeru dijagonale	$r = 0{,}117\,9\,h$
okrugli (s promjerom d)		$r = d/8$
prstenasti (s promjerima d i D)		$r = D/8 \cdot [1 + (d/D)^2]$.

c) Smik i torzija

Silu F koja djeluje na obodu rukavca promjera d, može se zamijeniti jednakom silom koja djeluje u središtu rukavca i momentom para sila $M_t = F\,r = F\,d/2$.



Sila kroz središte uzrokuje smično naprezanje τ_s

$$\tau_s = (4/3) \cdot F/S = (16/3) \cdot F/(\pi\,d^2).$$

Okretni moment dviju sila uzrokuje posmično naprezanje τ_t

$$\tau_t = 16\,M_t/(\pi\,d^3) = 8\,F/(\pi\,d^2).$$

Najveće ukupno naprezanje iznosi

$$\tau_m = \tau_s + \tau_t = (16/3) \cdot F/(\pi\,d^2) + 8\,F/(\pi\,d^2) = 40\,F/(3\,\pi\,d^2).$$

d) Savijanje i torzija

Presjek nosača je opterećen istodobno momentom savijanja M i okretnim momentom M_t.

Ekvivalentna naprezanja σ_{ekv} prema raznim teorijama čvrstoće:

po Bachu $\sigma_{ekv} = 0{,}35\,\sigma + 0{,}65\,\sqrt{\sigma^2 + 4\,(a_0\,\tau)^2} \le \sigma_{dop}$ $\quad a_0 = \sigma_{dop}/1{,}3\,\tau_{dop}$

po HMH[1] $\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma^2 + 3\,(a_0\,\tau)^2} \le \sigma_{dop}$ $\quad a_0 = \sigma_{dop}/1{,}73\,\tau_{dop}$

po Mohru $\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma^2 + 4\,(a_0\,\tau)^2} \le \sigma_{dop}$ $\quad a_0 = \sigma_{dop}/2\,\tau_{dop}$.

U svim navedenim primjerima σ je naprezanje na savijanje, a τ naprezanje na uvijanje (torziju) u točki promatranog presjeka nosača. σ_{dop} je dopušteno normalno naprezanje a τ_{dop} je dopušteno posmično naprezanje.

Pri okruglom presjeku ili krupnom vijencu javlja se najveće normalno naprezanje σ i tengencijalno naprezanje τ na rubu na istom mjestu. U tom slučaju ekvivalentno naprezanje iznosi:

$$\sigma_{ekv} = \xi\,M/W \le \sigma_{dop}$$

gdje je $W = \pi\,d^3/32$ za okrugli presjek, a $W = (\pi/32) \cdot (D^4 - d^4)$ za presjek kružnog vijenca i ξ faktor, koji ovisi o teoriji čvrstoće:

po Bachu $\quad \xi = 0{,}35 + 0{,}65\,\sqrt{1 + (\alpha_0\,M_t/M)^2}$

po HMH[1] $\quad \xi = \sqrt{1 + 0{,}75\,(\alpha_0\,M_t/M)^2}$

po Mohru $\quad \xi = \sqrt{1 + (\alpha_0\,M_t/M)^2}$.

[1] HMH – Huber, Mises i Hencky.

DINAMIKA

Dinamika je znanost o gibanju tijela. S obzirom na sile koje se javljaju pri gibanju, razlikujemo *kinematiku*, koja proučava gibanje tijela bez obzira na sile koje na nj djeluju, i *kinetiku*, koja proučava utjecaj djelovanja sila na gibanje tijela.

Kinematika

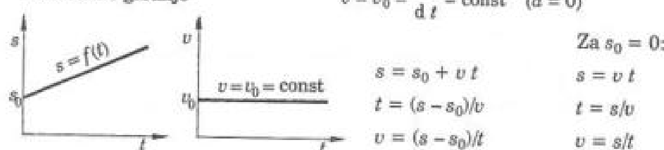
a) *Pravocrtno gibanje tvarne točke*

Oznake: put s — brzina $v = \frac{ds}{dt}$

početni put s_0 — početna brzina v_0

vrijeme t — ubrzanje $a = \frac{dv}{dt}$.

Jednoliko gibanje $\quad v = v_0 = \frac{ds}{dt} = \text{const} \quad (a = 0)$



$s = s_0 + v\,t$

$t = (s - s_0)/v$

$v = (s - s_0)/t$

Za $s_0 = 0$:

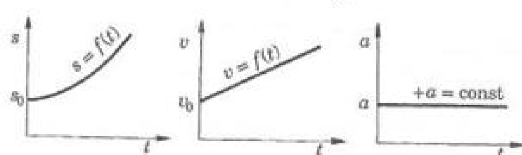
$s = v\,t$

$t = s/v$

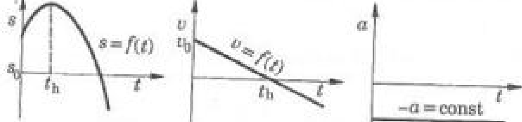
$v = s/t$

Jednolično ubrzano gibanje $\quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2} = \text{const.}$

Ubrzanje $+a$



Usporenje $-a$



$s = s_0 + (v + v_0)\,t/2$

$s = s_0 + (v^2 - v_0^2)/2\,a$

$s = s_0 + v_0 t + a\,t^2/2$

$v = v_0 + a\,t$

Za $s_0 = 0, v_0 = 0$:

$s = v\,t/2$

$s = v^2/2\,a$

$s = a\,t^2/2$

$v = a\,t$

Primjer: slobodni pad $\quad$ ubrzanje $a = g = 9{,}81\ \text{m/s}^2$

dubina $s = h$

$$v = g\,t = \sqrt{2\,g\,h} \qquad t = v/g = \sqrt{2\,h/g}.$$

b) *Krivocrtno gibanje tvarne točke*

Svako je krivocrtno gibanje ubrzano, jer se mijenja smjer brzine. Ubrzanje je uvijek usmjereno prema konkavnoj strani putanje. (Smjer ubrzanja ne podudara se sa smjerom brzine.)

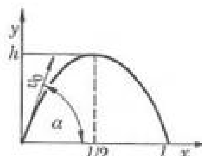
Kosi hitac (u zrakopraznom prostoru)

Početna brzina v_0 pod kutom α

$x = v_0\,t\cos\alpha \qquad y = v_0\,t\sin\alpha - g\,t^2/2$

$v_x = v_0\cos\alpha \qquad v_y = v_0\sin\alpha - g\,t$

$y = x\tan\alpha - g\,x^2/(2\,v_0^2\cos^2\alpha)$



Trajanje uspona ($v_y = 0$) $\quad t_h = v_0\sin\alpha/g$

Visina hitca: $\quad h = v_0^2/2\,g\cdot\sin^2\alpha \quad h_{max} = v_0^2/2\,g \quad$ pri $\alpha = 90°$

Domet hitca: $\quad l = v_0^2/g\cdot\sin 2\alpha \quad l_{max} = v_0^2/g \quad$ pri $\alpha = 45°$.

c) *Kružno gibanje*

Oznake:

kut $\hat{\varphi}$ — kutna brzina $\quad \omega = \frac{d\hat{\varphi}}{dt} \quad [\hat{\varphi}] = \text{rad}$

vrijeme t — kutno ubrzanje $\quad \varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$.

Jednolično kružno gibanje $\quad \omega = \frac{d\hat{\varphi}}{dt} = \text{const} \quad [\hat{\varphi}] = \omega\,t.$

Trajanje 1 okretaja (period vrtnje) $\quad T = 2\,\pi/\omega.$

Brzina vrtnje $\quad n = 1/T = \omega/2\pi \quad [n] = \text{s}^{-1}$

Obodna brzina (pri polumjeru r) $\quad u = r\,\omega = 2\,r\,\pi\,n.$

Jednolično ubrzano kružno gibanje

$$\omega = \omega_0 + at, \quad \hat{\varphi} = \hat{\varphi}_0 + \omega_0\,t + at^2/2 \qquad [\hat{\varphi}] = \omega\,t.$$

ω_0 početna kutna brzina

$\hat{\varphi}_0$ početni kut.

d) *Harmonijsko titranje*

Harmonijsko titranje je pravocrtno gibanje amo-tamo pri kojem je ubrzanje razmjerno putu.

Otklon $x = r \sin \varphi$ — r amplituda

$\hat{\varphi} = \omega t$ $(\omega = \text{const})$ $[\hat{\varphi}] = \text{rad}$

$x = r \sin \omega t$

Period (trajanje titranja) $T = 2\pi/\omega$

frekvencija: $f = 1/T = \omega/(2\pi)$

brzina: $v = r\,\omega \cos \omega t$

ubrzanje: $a = -r\,\omega^2 \sin \omega t = -\omega^2 x$

Kinetika

a) Newtonov zakon (osnovni zakon dinamike)

»Sila F je jednaka umnošku mase m i ubrzanja a« $\boldsymbol{F} = m\,\boldsymbol{a}$.

Ako su vektori sile i ubrzanja istog smjera, vrijedi $F = m\,a$.

Suma komponenata (F_{ix}, F_{iy}, F_{iz}) sile F_i koja djeluje na masu m proporcionalna je s komponentama ubrzanja (a_x, a_y, a_z)

$$\Sigma F_{ix} = m\,a_x \qquad \Sigma F_{iy} = m\,a_y \qquad \Sigma F_{iz} = m\,a_z$$

Izraz $(m\,a)$ nazivamo »silom tromosti«.

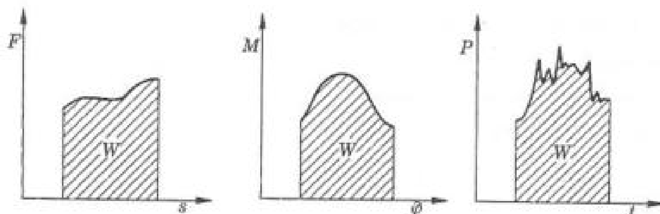
Mehanički je sustav u dinamičkoj ravnoteži ako je suma svih vanjskih sila koje na nj djeluju i svih sila tromosti sustava jednako ništici (D'Alembertovo načelo)

$$\Sigma F_i - \Sigma m_i\,a_i = 0.$$

b) Zakretni moment M sile F na kraku r: $M = F\,r$.

Obodna sila: $F = M/r$

c) Rad W sile F na putu s ili zakretnog momenta M pri zakretu za kut $\hat{\varphi}$ ($[\hat{\varphi}] = \text{rad}$) ili snage P u vremenu t



$W = \int \boldsymbol{F}\,\mathrm{d}s = \int \boldsymbol{F}\,v\,\mathrm{d}t$ $\qquad W = \int M\,\mathrm{d}\hat{\varphi} = \int M\,\omega\,\mathrm{d}t$ $\qquad W = \int P\,\mathrm{d}t$

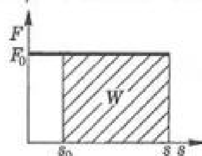
Kad su vektori $\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{v}$ i $\boldsymbol{s}$ istog smjera vrijedi:

$F = \text{const}$ $\quad W = F\,s$ $\quad M = \text{const}$ $\quad W = M\,\hat{\varphi}$ $\quad P = \text{const}$ $\quad W = P\,t$

Rad pomaka

$F = F_0 = \text{const}$

$$W = \int_{s_0}^{s} F\,\mathrm{d}s = F\,(s - s_0).$$

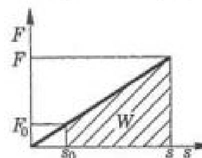


Elastičan deformacijski rad

$F = k\,s$

k konstanta elastičnosti opruge

$$W = \int_{s_0}^{s} F\,\mathrm{d}s = k\,\frac{s^2 - s_0^2}{2} = \frac{F + F_0}{2}\,(s - s_0).$$



d) Snaga P je brzina promjene rada, tj. derivacija rada W po vremenu t

$$P = \frac{\mathrm{d}\,W}{\mathrm{d}\,t} = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{v} = \boldsymbol{F} \cdot \frac{\mathrm{d}\,\boldsymbol{s}}{\mathrm{d}\,t} \qquad P = M_t\,\omega.$$

Ako su vektori $\boldsymbol{F}$ i $\boldsymbol{v}$ paralelni snazi P i ako je F konstantna vrijedi

$$P = W/t \quad P = F\,v \quad P = M_t\,\omega = M_t\,2\,\pi\,n.$$

e) Korisnost nekog procesa, stroja ili uređaja jest omjer između korisno dobivene energije W (snage P) i utrošene energije W_0 (snage P_0)

$$\eta = W/W_0 = P/P_0 < 1.$$

f) Kinetička energija W_k je energija mase u gibanju.

Pri pravocrtnom gibanju izražavamo kinetičku energiju masom m i brzinom v

$$W_k = m\,v^2/2.$$

Pri kružnom gibanju izražavamo kinetičku energiju momentom tromosti J (v. str. 157, 158) i kutnom brzinom ω

$$W_k = J\,\omega^2/2.$$

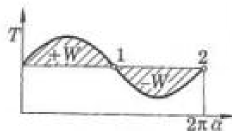
Za promjenu kinetičke energije

od $\quad W_0 = m\,v_0^2/2 + J\,\omega_0^2/2 \quad$ na $\quad W_k = m\,v^2/2 + J\,\omega^2/2$

potreban je rad

$$W = m\,(v^2 - v_0^2)/2 + J\,(\omega^2 - \omega_0^2)/2.$$

Zamašnjak



Nejednoliki zakretni moment M pogonskog stroja, koji se mijenja za vrijeme jednog okretaja (2π), povećava kutnu brzinu zamašnjaka do ω_{max} (u točki 1) i smanjuje je do ω_{min} (u točki 2).

Srednja kutna brzina

$$\omega_{med} = (\omega_{max} + \omega_{min})/2$$

Stupanj nejednoličnosti

$$\delta = (\omega_{max} - \omega_{min})/\omega_{med}.$$

Primljeni odnosno predani rad zamašnjaka, koji ima moment tromosti mase J i prosječnu brzinu vrtnje n iznosi

$$W = J\,(\omega^2_{max} - \omega^2_{min})/2 = J\,\omega^2_{med}\,\delta = J \cdot 4\,\pi^2\,n_{med}\,\delta.$$

g) Potencijalna energija E_p je energija položaja (stanja). Tijelo mase m, tj. težna sila $F_g = m\,g$, ima s obzirom na neku ravninu, iznad koje se nalazi na visini h, potencijalnu energiju

$$E_p = m\,g\,h = F_g\,h.$$

Osim tog primjera, potencijalna se energija pojavljuje i kao energija napete opruge ili komprimiranog plina, kao toplinska ili kemijska energija itd.

h) Impuls sile $\boldsymbol{F}\,dt$ izražava djelovanje sile $\boldsymbol{F}$ u vremenu t, a jednak je promjeni količine gibanja $m\,\boldsymbol{v}$

$$\boldsymbol{F}\,dt = m\,d\boldsymbol{v}$$

$$\int \boldsymbol{F}\,dt = m\,(\boldsymbol{v} - \boldsymbol{v}_0)$$

gdje je: $\boldsymbol{v}_0$ početna brzina.

Za F = const vrijedi:

$$\boldsymbol{F}\,t = m(\boldsymbol{v} - \boldsymbol{v}_0).$$

Ako su vektori $\boldsymbol{F}$ i $\boldsymbol{v}$ istoga smjera, bit će:

$$F\,t = m(v - v_0).$$

*

Za sustav tvarnih točaka vrijedi:

$$\Sigma \boldsymbol{F}_i = \boldsymbol{a}_0\,\Sigma m_i$$

gdje je: $\boldsymbol{a}_0$ ubrzanje težišta.

Težište sustava tvarnih točaka giba se kao da je u njemu združena sva masa sustava sa svim vanjskim silama koje na nj djeluju.

Nema li vanjskih sila (odnosno ako su u međusobnoj ravnoteži pa je njihova rezultanta jednaka ništici), vrijedi

$$\Sigma m_i\,\boldsymbol{a}_i = 0$$

$$\Sigma m_i\,\boldsymbol{v}_i = \text{const.}$$

i) Moment impulsa $\boldsymbol{M}\,dt$ je moment količine gibanja $m\,\boldsymbol{v}$ s obzirom na neku točku (pol) ili os

$$\boldsymbol{M}\,dt = \boldsymbol{r}\,m\,d\boldsymbol{v} = J\,d\omega$$

$$\int \boldsymbol{M}\,dt = \boldsymbol{r}\,m\,(\boldsymbol{v} - \boldsymbol{v}_0) = J\,(\omega - \omega_0)$$

gdje je: $\boldsymbol{r}$ okomita udaljenost točke (osi) od smjera vektora brzine $\boldsymbol{v}$, J moment tromosti s obzirom na točku (os), ω kutna brzina.

Moment impulsa je vektor okomit na ravninu vektora $\boldsymbol{v}$ i $\boldsymbol{r}$.

Pri rotaciji sustava tvarnih točaka oko neke osi vrijedi:

$$\int M\,dt = \int F\,r\,dt = \Sigma\,(r_i\,m_i\,v_i) - \Sigma\,(r_i\,m_i\,v_{i0}) = J\,(\omega - \omega_0).$$

Moment tromosti

– aksijalni (s obzirom na os x)

$$J_x = \int r_x^2\,dm \qquad r_x^2 = y^2 + z^2$$

– polarni (s obzirom na pol)

$$J = \int r^2\,dm \qquad r^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

Polumjer tromosti i $\quad i = \sqrt{J/m} \quad J = m\,i^2.$

Moment zamaha $m\,D^2$ $\quad i = D/2 \quad J = m\,D^2/4 \quad m\,D^2 = 4\,J.$

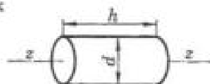
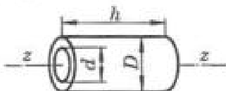
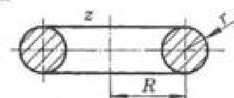
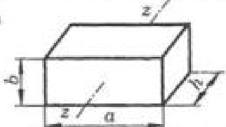
Steinerovo pravilo

$$J_a = J_t + me^2$$

J_t moment tromosti tijela s obzirom na os kroz težište tijela.

J_a moment tromosti tijela s obzirom na os koja je paralelna s osi kroz težište i od nje udaljena za e.

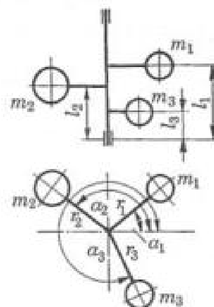
Momenti tromosti tijela (gustoće ϱ)

Valjak 	$J_z = \frac{1}{2} m\, r^2 = \frac{\pi}{32} d^4 h\, \varrho$ $m = d^2 \pi/4 \cdot h\, \varrho$
Šuplji valjak 	$J_z = \frac{1}{2} m\, (R^2 + r^2) = \frac{\pi}{32} (D^4 - d^4)\, h\, \varrho$ $m = (D^2 - d^2)\, \pi/4 \cdot h\, \varrho$
tankih stijena $d_m = (D + d)/2$ $s = (D - d)/2$	$J_z \approx m\, r_m^2 = \frac{\pi}{4} d_m^3\, s\, h\, \varrho$ $m \approx d_m \pi\, s\, h\, \varrho$
Kugla $d = 2\,r$ (os z kroz središte)	$J_z = \frac{2}{5} m\, r^2 = \frac{\pi}{60} d^5\, \varrho$ $m = \pi/6 \cdot d^3\, \varrho$
Šuplja kugla $D = 2\,R$ $d = 2\,r$	$J_z = \frac{2}{5} m \frac{R^5 - r^5}{R^3 - r^3} = \frac{\pi}{60} (D^5 - d^5)\, \varrho$ $m = \pi/6 \cdot (D^3 - d^3)\, \varrho$
tankih stijena $d_m = (D + d)/2$ $s = (D - d)/2$	$J_z \approx \frac{2}{3} m r_m^2 = \frac{\pi}{6} d_m^4\, s\, \varrho$ $m = \pi\, d_m^2\, s\, \varrho$
Prsten 	$J_z \approx m \left(R^2 + \frac{3}{4} r^2\right) = 2\,\pi^2 R\, r^2 \left(R^2 + \frac{3}{4} r^2\right) \varrho$ $m \approx 2\, p^2 R\, r^2\, \varrho$
Ploča 	$J_z = \frac{1}{12} m\, (a^2 + b^2) = \frac{1}{12} a\, b\, h\, (a^2 + b^2)\, \varrho$ $m = a\, b\, h\, \varrho$

Centrifugalna sila F_c mase m, koja rotira obodnom brzinom u ili kutnom brzinom ω na polumjeru r_0 (udaljenost težišta tijela od osi rotacije)

$$F_c = m\, u^2/r_0 = m\, r_0 \omega^2.$$

Dinamička ravnoteža



Osovina je u dinamičkoj ravnoteži ako na nju ne djeluju nikakve centrifugalne sile ili se utjecaji tih sila međusobno poništavaju (»slobodna osovina«).

Uvjeti dinamičke ravnoteže su:

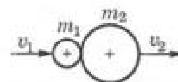
$$\Sigma\, m_i r_i \sin \alpha_i = 0$$
$$\Sigma\, m_i r_i \cos \alpha_i = 0$$
$$\Sigma\, m_i r_i\, l_i \sin \alpha_i = 0$$
$$\Sigma\, m_i r_i\, l_i \cos \alpha_i = 0$$

Sudar je dodir dvaju tijela u vrlo kratkom vremenu razmjerno velikim silama.

Centralni sudar

Mase m_1 i m_2 koje se giblju po istom pravcu sudaraju se brzinama (prije sudara) v_1 odnosno v_2.

Brzine masa m_1 i m_2 nakon sudara



$$u_1 = v_1 - (1 + \varepsilon)\,(v_1 - v_2) \frac{m_2}{m_1 + m_2}$$
$$u_2 = v_2 + (1 + \varepsilon)\,(v_1 - v_2) \frac{m_1}{m_1 + m_2}.$$

Faktor sudara

$$\varepsilon = (u_2 - u_1)/(v_1 - v_2).$$

Zbog gubitaka je (zvuk, deformacija, toplina) $0 < \varepsilon < 1$:

Tvar obaju tijela	staklo	čelik	slonovača	pluto	drvo
ε	0,95	0,6 ... 0,95	0,9	0,55	0,5

(ε u čeliku raste s tvrdoćom)

$\varepsilon = 0$ idealno plastičan sudar

$$u_1 = u_2 = (m_1 v_1 + m_2 v_2)/(m_1 + m_2)$$

$\varepsilon = 1$ idealno elastičan sudar

$$u_1 = v_1 - 2\,(v_1 - v_2)\, m_2/(m_1 + m_2)$$
$$u_2 = v_2 + 2\,(v_1 - v_2)\, m_1/(m_1 + m_2).$$

Gubitak energije pri sudaru

$$W = (1 - \varepsilon^2)\,(v_1 - v_2)^2\, m_1 m_2/2\,(m_1 + m_2).$$

Titranje

1. *Slobodno neprigušeno titranje*

Giba li se tvarna točka periodično s frekvencijom f tako, da je sila F koja na nju djeluje razmjerna razmaku y od središnjeg položaja, a suprotna po smjeru, bit će gibanje harmonijsko

$$F = -c\,y \qquad c \text{ je konstanta opruge.}$$

Vlastita frekvencija f neprigušenoga harmonijskoga titranja

$$f = 1/2\pi \cdot \sqrt{c/m}\,.$$

Iz diferencijalne jednadžbe neprigušenoga harmonijskoga titranja

$$m\,(d^2y/dt^2) + cy = 0$$

proizlazi rješenje:

put	$y = y_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$	y_m	– amplituda
brzina	$v = v_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$	$\lvert v_m \rvert$	$= \omega\, y_m$
ubrzanje	$a = -a_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$	$\lvert a_m \rvert$	$= \omega^2 y_m$

gdje je:

t vrijeme, φ fazna konstanta

$\omega_0 = 2\pi f$ »kružna frekvencija« vlastitog titranja

$\omega_0 = \sqrt{c/m}$ – pri osnom titranju

$\omega_0 = \sqrt{c/J}$ – pri kružnom titranju

Period (vrijeme njihanja) $\quad T = 1/f = 2\pi/\omega_0\,.$

2. *Prigušeno slobodno titranje*

Djeluje li na tvarnu točku što titra otpor R koji je razmjeran brzini, ali suprotan po smjeru, bit će titranje prigušeno

$$R = -k\,(dy/dt) \qquad k \text{ je konstanta prigušivanja.}$$

Za prigušeno titranje vrijedi diferencijalna jednadžba

$$m\,(d^2y/dt^2) + k\,(dy/dt) + cy = 0.$$

Uvođenjem izraza

$$\lambda = k/2m = \nu\omega_0 \qquad \nu = k/2\sqrt{c\,m}$$

dobivamo rješenje diferencijalne jednadžbe

$$y = y_0\, e^{-\lambda t} \sin(\omega\, t + \varphi)$$

gdje je kružna frekvencija prigušenoga titranja

$$\omega = \sqrt{(c/m) - \lambda^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \nu^2}$$

$\nu = 0$ – neprigušeno titranje $\qquad \nu < 1$ – periodičko prigušeno titranje.

Pri aperiodičnom gibanju ($\nu > 1$) nema titranja pa se put y postupno približava ništici.

3. *Prigušeno titranje*

Na tvarnu točku koja titra djeluje, osim otpora R, još i vanjska sila F, npr.

$$F = F_0 \sin \omega\, t.$$

Za takvo titranje vrijedi jednadžba

$$m\,(d^2y/dt^2) + k\,(dy/dt) + c\,y = F_0 \sin \omega\, t.$$

Za rješenje $y = y_0\, e^{-\lambda t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + C \sin(\omega t - \varphi_2)$

$\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 - \nu^2}$	– frekvencija vlastitog prigušenog titranja
φ_1, φ_2	– fazne konstante
C	– amplituda titranja

$$C = F_0/(m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + 4\,\lambda^2 \omega^2}\,.$$

Približava li se kružna frekvencija ω prisilnog titranja kružnoj frekvenciji ω_0 vlastitog titranja, amplituda se titranja povećava i dostiže maksimum (rezonancija) pri kružnoj frekvenciji

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - 2\,\nu^2}$$

odnosno, uz neznatno prigušivanje pri kritičnoj kružnoj frekvenciji ω_k

$$\omega_k = \omega_0 = \sqrt{c/m}\,.$$

Pri prisilnom titranju bez prigušivanja postala bi amplituda kritične kružne frekvencije beskonačno velikom.

4. *Kritična brzina vrtnje osovine*

Karakteristika je elastičnog progiba osovine omjer c između sile F i produljenja (skraćenja) y

$$c = F/y.$$

Pri ekscentričnosti e težišta osovine mase m pri rotaciji djeluje na nju centrifugalna sila F_c, koja dodatno deformira osovinu za vrijednost y. Centrifugalna sila, čije je hvatište u težištu, udaljenom za $e + y$ od središnjice osovine u mirovanju, iznosi pri rotaciji kutnom brzinom ω

$$F_c = m\,\omega^2 (e + y) = c\,y$$

Progib osovine pri rotaciji je

$$y = (m\, e\, \omega^2)/(c - m\, \omega^2).$$

Za kutnu brzinu pri kojoj bi bilo $c = m\,\omega^2$ (ne uzimajući u obzir prigušivanje) bilo bi $y = \infty$. Tome odgovaraju

kritična kutna brzina: $\omega_k = \sqrt{c/m}$, $\quad$ kritična brzina vrtnje: $n_k = \omega_k/2\pi$.

Za određivanje omjera c elastičnog progiba može se uzeti progib y_0 osovine u mirovanju što ga izaziva težna sila osovine $F_g = mg$:

$$c = F_g/y_0 = m\,g/y_0 \qquad \omega_k = \sqrt{g/y_0}$$

Naraste li kutna brzina ω iznad kritične ω_k

$$\omega > \omega_k$$

smanjit će se progib y osovine pri rotaciji (osovina će se sama centrirati).

HIDROMEHANIKA

Zakone hidromehanike primjenjujemo za fluide (tekućine), tj. za sve kapljevine i na plinove. Isključene su tzv. newtonovske tekućine, kao npr. krv, katran, asfalt, med i sl.

Pri nestlačivom fluidu mase m obujam V i gustoća ϱ su konstantni

$$V = \text{const} \qquad \varrho = m/V = \text{const.}$$

U *idealnom fluidu* nema sila viskoznog trenja. Takav fluid ne postoji, ali njime često pojednostavljujemo računske probleme. U *realnom fluidu* postoji viskozno trenje između čestica – fluid je viskozan.

Viskoznost je otpor fluida protusmičnim silama ili krutim deformacijama čestica.

Dinamička viskoznost definirana je Newtonovim zakonom

$$\tau = \eta \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}$$

gdje je: τ naprezanje na smik, dv razlika u brzini slojeva na razmaku dy, η apsolutna (dinamička) viskoznost.

Kinematička viskoznost ν je omjer dinamičke viskoznosti η i gustoće ϱ

$$\nu = \frac{\eta}{\varrho}.$$

Mjerne jedinice za viskoznost (v. str. 73, 95, 96). Brojčane vrijednosti za kinematičku viskoznost predočene su u tablicama na str. 245 ... 247.

HIDROSTATIKA

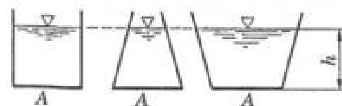
Hidrostatički tlak p je tlak u tekućini, uzrokovan težnom silom. Ovisi o visini h razine (nivoa) tekućine iznad mjesta mjerenja i gustoći tekućine ϱ

$$p = \varrho\, g\, h$$

gdje je: g težno ubrzanje (= 9,81 m/s^2).

Sila tlaka F na horizontalno dno posude ovisi o hidrostatičkom tlaku p i o ploštini dna A

$$F = p\,A = \varrho\, g\, h\, A.$$



Ta sila tlaka, međutim, ne ovisi o obliku posude (»hidrostatički paradoks«).

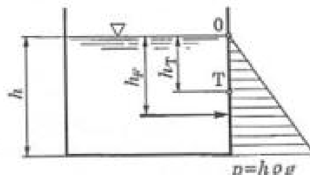
Uzgon F_u je sila kojom tekućina djeluje okomito prema gore na tijelo uronjeno u tekućinu. Veličinom je jednak težnoj sili istisnute tekućine, a hvatište mu je u njezinu težištu (Arhimedov zakon)

$$F_u = m\, g = \varrho\, g\, V$$

gdje je: m masa, V obujam istisnute tekućine (istisnine), a ϱ njena gustoća.

Sila tlaka na stijenke

Sila tlaka F tekućine, gustoće ϱ, na ravnu stijenku posude kojoj je oplakana ploha površine A iznosi



$$F = \varrho\, g\, h_T A$$

h_T je vertikalna udaljenost težišta (T) oplakane plohe od razine tekućine. Hvatište sile F je, međutim, ispod težišta plohe, na dubini

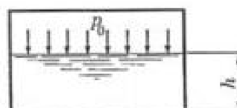
$$h_F = \frac{I}{h_T A}$$

gdje je: I moment tromosti oplakane plohe s obzirom na njezin rub u visini razine tekućine (0).

Pascalov zakon

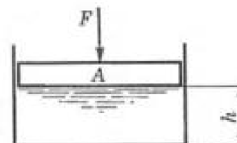
Narinuti tlak širi se po tekućini nesmanjeno i jednako u svim smjerovima.

Tlak p na dno posude u kojoj je iznad površine tekućine (visine h i gustoće ϱ) tlak p_0



$$p = p_0 + \varrho\, g\, h.$$

Tlak p na dno posude, uzrokovan je u tekućini silom F na stap površine A



$$p = \frac{F}{A} + \varrho\, g\, h.$$

Atmosferski tlak p_a na površini tekućine uzrokuje u tekućini stvarni tlak koji je veći od hidrostatičkog i iznosi

$$p = p_a + \varrho\, g\, h.$$

Pri proračunavanju posuda s obzirom na tlak tekućine, atmosferski tlak u tekućini ne uzimamo u obzir jer on djeluje i s druge strane stijenke posude, pa se djelovanja, u odnosu na stijenke, međusobno poništavaju.

Atmosfersko stanje

Tlak zraka p_a, temperatura t i gustoća ϱ. Višegodišnji prosjek *(po: Mende/Simon)*

Godišnja dob	Tlak $\frac{p_a}{\text{mbar}}$		Temperatura $\frac{t}{°\text{C}}$		Gustoća $\frac{\varrho}{\text{kg/m}^3}$	
	na visini h (m)					
	0	2 000	0	2 000	0	2 000
siječanj	1 019	791	0	–3	1,28	1,026
srpanj	1 015	799	16	7	1,23	0,996
godišnji prosjek	1 016	795	8	0	1,25	1,008

Vremenski utjecaji mijenjaju: tlak zraka za ± 5 %, gustoću zraka za ± 20 %, a relativnu vlagu φ zraka (v. str. 231) između 60 i 100 %.

Pri potpunoj zasićenosti zraka (φ = 100 %) apsolutna vlaga x ovisi o temperaturi t:

t/°C	–20	–10	0	10	20	30
x/(g/m^3)	0,883	2,14	4,86	9,46	17,5	31,1

Normalne vrijednosti tlaka zraka p_a, temperature t i gustoće ϱ pri različitim nadmorskim visinama h (po ICAO – International Civil Aviation Organization)

$\frac{h}{m}$	$\frac{p_a}{\text{mbar}}$	$\frac{t}{°\text{C}}$	$\frac{\varrho}{\text{kg/m}^3}$	$\frac{h}{m}$	$\frac{p_a}{\text{mbar}}$	$\frac{t}{°\text{C}}$	$\frac{\varrho}{\text{kg/m}^3}$
0	1 013	15	1,225	2 500	737	– 1,25	0,945
100	1 001	14,35	1,214	3 000	701	– 4,5	0,910
200	989	13,7	1,202	4 000	616	– 11	0,819
300	978	13,05	1,191	5 000	540	– 17,5	0,736
400	966	12,4	1,179	6 000	472	– 24	0,660
500	954	11,75	1,167	8 000	356	– 37	0,526
600	943	11,1	1,157	10 000	265	– 50	0,413
800	921	9,8	1,135	12 000	195	– 56,5	0,314
1 000	898	8,5	1,111	15 000	121	– 56,5	0,195
1 200	877	7,2	1,091	20 000	55	– 56,5	0,088 9
1 500	845	5,25	1,060	25 000	25	– 56,5	0,040 6
2 000	795	2,0	1,007	30 000	12	– 42,8	0,017 9

Kinematička viskoznost ν pri različitim nadmorskim visinama h:

h/km	0	5	10	15	20	25	30
ν/(mm^2/s)	14,61	22,10	35,23	73,03	160,0	350,0	835,7

HIDRODINAMIKA

Promatramo *stacionarno strujanje*, tj. ono, pri kojem brzina u određenoj točki ne mijenja s vremenom ni veličinu ni smjer.

U *laminarnom strujanju* se čestice gibaju beskrajno tankim slojevima koji kližu jedan po drugome bez miješanja, a u *turbulentnom strujanju* se čestice gibaju nepravilno u svim smjerovima. U obzir uzimamo samo njihovo prosječno gibanje u smjeru strujanja.

Jednadžba kontinuiteta je maseni protok q_m = const, što možemo izraziti presjekom A, brzinom v i gustoćom ϱ

$$q_m = A\, v\, \varrho = \text{const.}$$

Za nestlačive fluide, za koje vrijedi ϱ = const, i obujmani protok je q_V = const

$$q_V = A\, v = \text{const.}$$

Bernoullijeva jednadžba za stacionarno strujanje idealnog nestlačivog fluida (bez viskoznog trenja) je suma svih energija (položajne + tlačne + brzinske) u svakom presjeku (na svakoj strujnici) konstantna. Bernoullijevu jednadžbu možemo izraziti (za dva promatrana presjeka 1 i 2)

– specifičnom energijom

$$g\, z_1 + \frac{p_1}{\varrho} + \frac{v_1^2}{2} = g\, z_2 + \frac{p_2}{\varrho} + \frac{v_2^2}{2} = e = \text{const}$$

– tlakom

$$\varrho\, g\, z_1 + p_1 + \frac{1}{2}\varrho\, v_1^2 = \varrho\, g\, z_2 + p_2 + \frac{1}{2}\varrho\, v_2^2 = p = \text{const}$$

– tlačnom visinom

$$z_1 + \frac{p_1}{\varrho\, g} + \frac{v_1^2}{2\, g} = z_2 + \frac{p_2}{\varrho\, g} + \frac{v_2^2}{2\, g} = H = \text{const.}$$

Bernoullijeva jednadžba za stacionarno strujanje realnog fluida uzima u obzir gubitke (od presjeka 1 do 2), koje izražavamo gubitkom specifične energije Δe_t

$$g\, z_1 + \frac{p_1}{\varrho} + \frac{v_1^2}{2} = g\, z_2 + \frac{p_2}{\varrho} + \frac{v_2^2}{2}$$

ili gubitkom tlaka Δp_t

$$\varrho\, g\, z_1 + p_1 + \frac{1}{2}\varrho\, v_1^2 = \varrho\, g\, z_2 + p_2 + \frac{1}{2}\varrho\, v_2^2 + \Delta p_t$$

ili gubitkom tlačne visine Δh_t

$$z_1 + \frac{p_1}{\varrho\, g} + \frac{v_1^2}{2\, g} = z_2 + \frac{p_2}{\varrho\, g} + \frac{v_2^2}{2\, g} + \Delta h_t.$$

U tim su jednadžbama: z_i geodetska visina nad po želji odabranim horizontom, $p_i = \varrho\, g\, h_i$ statički tlak u fluidu (gdje je h_i tlačna visina), ϱ gustoća i v_i brzina strujanja.

Gubitak tlaka Δp_t ili tlačne visine Δh_t računamo s Darcyjevom formulom (str. 169).

Bernoullijeva jednadžba za sustav koji jednoliko rotira (s gubitcima)

$$\varrho\, g\, z_1 + p_1 + \frac{1}{2}\varrho\,(w_1^2 - u_1^2) = \varrho\, g\, z_2 + p_2 + \frac{1}{2}\varrho\,(w_2^2 - u_2^2)\,.$$

Osim oznaka navedenih gore, u ovoj jednadžbi znače: w_i relativnu brzinu fluida (s obzirom na rotirajući kanal), u_i obodnu brzinu rotacije sustava.

Impulsni stavak. Struja fluida masenog protoka q_m promijenit će pod utjecajem vanjskih sila (kojih je suma F) brzinu za Δv

$$F = q_m \cdot \Delta v = q_m\,(v_2 - v_1) = -R$$

gdje je $q_m\, v$ sekundni impuls.

Kako su sile i brzine vektorske naravi, treba istaknuti da je smjer sile F (odn. F_R) identičan sa smjerom promjene brzine Δv.

Sila F, kojom okoliš djeluje na fluid jest *aktivna sila*, dok je sila F_R, kojom fluid djeluje na okoliš – *reaktivna sila*. (Npr. u turbinama fluid djeluje na lopatice silom F_R, dok u pumpama lopatice djeluju na fluid silom F.)

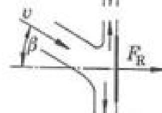
Sila mlaza na plohu



Maseni protok mlaza je q_m, brzina mlaza je v.

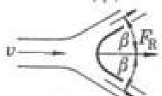
Ravna ploča, smještena okomito na smjer mlaza, izložena je sili mlaza

$$F_R = q_m\, v.$$



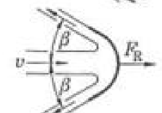
Ravna ploča, na koju udara mlaz pod kutom β, izložena je sili mlaza

$$F_R = q_m v \cos\beta.$$



Konveksna ploča, na koju udara mlaz u sredini i otklanja se od prvotnog smjera pod kutom β, izložena je sili mlaza

$$F_R = q_m\, v\,(1 - \cos\beta).$$



Konkavna ploča, na koju udara mlaz u sredini i skreće unatrag pod kutom β, izložena je sili

$$F_R = q_m v\,(1 + \cos\beta).$$

Za kut $\beta = 0°$ sila mlaza iznosi $F_R = 2\, q_m v$.

Konkavna ploča, na koju udara mlaz pod kutom β_1 i skreće unatrag pod kutom β_2, izložena je sili mlaza

$$F_R = q_m v\,(\cos\beta_1 + \cos\beta_2).$$

Za kutove $\beta_1 = \beta_2 = 0°$ sila mlaza je $F_R = 2\, q_m v$.

Reakcija mlaza, koji izlazi s masenim protokom q_m i brzinom v kroz izlazni otvor presjeka A iz posude, gdje vlada tlak p iznosi

$$F_R = q_m\, v = 2\, A\, p.$$

Brzina istjecanja

Teorijska brzina istjecanja kroz maleni otvor iz otvorene posude u kojoj je stalna razina tekućine visine h iznad izlaza (Torricellijeva formula)

$$v_0 = \sqrt{2\, g\, h}$$

gdje je g težno ubrzanje.

Teorijska brzina istjecanja iz posude u kojoj je iznad tekućine, gustoće ϱ, pretlak Δp

$$v_0 = \sqrt{2\,(g\, h + \Delta p/\varrho)}\,.$$

Ako visinu h ne treba uzeti u obzir (kod plinova i para), teorijska brzina istjecanja pri pretlaku Δp

$$v_0 = \sqrt{2\,\frac{\Delta p}{\varrho}}\,.$$

Zbog trenja u mlazu i na sapnici bit će stvarna brzina manja

$$v = \varphi\, v_0.$$

U dobro zaobljene sapnice faktor je brzine $\varphi = 0{,}95 \ldots 0{,}99$.

Količina istjecanja

a) Količina istjecanja kroz otvor presjeka A, izražena masenim faktorom q_m, iznosi

$$q_m = A\, \varrho\, v$$

gdje je v izlazna brzina i ϱ gustoća fluida.

Zbog kontrakcije mlaza μ i uzimajući u obzir faktor brzine φ dobivamo

$$q_m = \alpha\, A\, \varrho\, v_0$$

α je faktor istjecanja koji združuje faktore kontrakcije i brzine: $\alpha = \mu\, \varphi$.

Pri istjecanju tekućine iz otvorene posude je

$$q_m = \alpha\, A\, \varrho\, \sqrt{2\, g\, h}\,.$$

Za istjecanje iz zatvorene posude u kojoj je iznad površine tekućine pretlak Δp vrijedi

$$q_m = \alpha\, A\, \varrho\, \sqrt{2\,(g\, h + \Delta p/\varrho)}\,.$$

Za $h = 0$ (vrijedi za plinove i pare) dobiva se

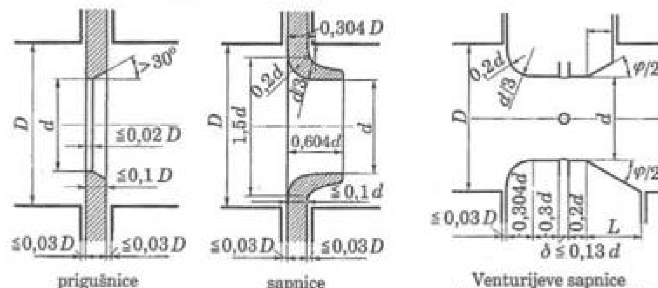
$$q_m = \alpha\, A\, \sqrt{2\, \varrho \cdot \Delta p}\,.$$

b) Količina je istjecanja kroz otvor presjeka A, izražena obujamnim protokom fluida q_V,

$$q_V = q_m/\varrho = \alpha\, A\, v_0.$$

Protok

1. Za određivanje protoka kroz cjevovod rabe se:



prigušnice — sapnice — Venturijeve sapnice (gore – kraći, dolje – dulji)

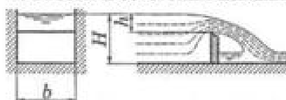
Protječe li najužim otvorom presjeka A fluid gustoće ϱ, nastat će (pri prigušnici i sapnici) pad tlaka Δp. Protok izražavamo:

– masenim protokom q_m $\qquad q_m = \alpha\, \varepsilon\, A \sqrt{2\, \varrho \cdot \Delta p}$

– obujamnim protokom q_V $\qquad q_V = \alpha\, \varepsilon\, A \sqrt{2 \cdot \Delta p / \varrho}$.

Faktor protjecanja α, faktor ekspanzije ε i izmjere prigušnog elementa, kao i izmjere kod izradbe i montaže tih elemenata, nalaze se u postojećim normama (ISO, DIN).

2. Protok u otvorenim kanalima mjerimo s preljevima. Za pravokutni preljev visine h i širine b vrijedi



$$q_V = \frac{2}{3} \mu\, h\, b \sqrt{2\, g\, h}.$$

Faktor μ ovisan je o visini H i h

	h (m)					
	0,025	0,050	0,100	0,200	0,400	0,800
H = 0,6 m	0,639	0,629	0,630	0,652	–	–
H = 1,0 m	0,638	0,628	0,624	0,630	0,666	–
H = 1,6 m	0,638	0,627	0,622	0,623	0,636	0,693
H = 2,4 m	0,638	0,627	0,622	0,620	0,626	0,650

Zakoni sličnosti strujanja

Promjene pri strujanju ne možemo obuhvatiti samo teorijski, već ih treba i mjeriti. Strujanja, međutim, ne moramo mjeriti na predmetima u naravnoj veličini, već to možemo i na geometrijski sličnim modelima (manjima ili većima). Za to se mora, osim geometrijske, postići još kinematička i dinamička sličnost strujanja.

Reynoldsova značajka sličnosti Re najčešće je rabljeni kriterij za sličnost strujanja nestlačivih tekućina u potpuno ispunjenim cijevima gdje težna sila ne utječe na profil brzine.

Reynoldsova značajka sličnosti (bezdimenzijska) jest omjer sila tromosti i sila trenja i iznosi

$$Re = \frac{v\, l}{\nu}$$

gdje su: v mjerodavna brzina, l mjerodavna duljina, ν kinematička viskoznost.

Kinematička viskoznost ν je (pri 20 °C) za vodu 1,01 mm^2/s, a za zrak 15,7 mm^2/s. Kinematička viskoznost za vodu, zrak i druge fluide pri različitim temperaturama predočena je na str. 245 ... 247.

Pri okruglim je cijevima promjera d: $\qquad Re = vd/\nu$

Općenito vrijedi: $\qquad Re = vd_H/\nu$

d_H je tzv. »hidraulički promjer«

$$d_H = 4\, A/O$$

gdje su: A presjek voda, O fluidom oplakani opseg.

Reynoldsovom značajkom sličnosti razgraničujemo laminarno i turbulentno strujanje. Za strujanje u cijevima vrijedi:

$Re < 2320$ – laminarno strujanje

$Re > 2320$ – turbulentno strujanje.

Otpori strujanja u cijevima i armaturama

Gubitak tlaka zbog otpora pri strujanju fluida gustoće ϱ brzinom v daje Darcyjeva formula

$$\Delta p = \zeta\, \varrho\, v^2/2$$

gdje su: ζ faktor gubitaka, koji je za ravne cijevi kružnog presjeka

$$\zeta = \lambda\, l/d$$

gdje su: λ faktor trenja, l duljina cijevi, d promjer cijevi.

1. Faktor trenja λ

Faktor trenja λ ovisi o Reynoldsovoj značajci sličnosti Re i relativnoj hrapavosti cijevi k/d, gdje je k apsolutna hrapavost (prosječna visina izbočina) stijenke.

U laminarnom području (do $Re < 2320$) λ ovisi o obliku cijevi i o Re, te je

$$\lambda = \varphi\, 64/Re$$

gdje je φ faktor oblika cijevi. Za okrugle cijevi, za koje je $\varphi = 1$,

$$\lambda = 64/Re = 64\, \nu/vd.$$

Pri turbulentnom strujanju ($Re > 2320$) razlikujemo:

a) *Hidraulički glatke cijevi* smatramo do

$$Re \approx d/k \cdot \lg(0{,}1\, d/k) \approx 2\, d/k.$$

Za proračun λ_g služi Prandtl-Kármánova formula

$$1/\sqrt{\lambda_g} = 2 \lg (0{,}398\, Re \sqrt{\lambda_g}).$$

Vrijednosti λ_g za različite Re:

Re	2320	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8
λ_g	0,047 25	0,030 89	0,018	0,011 65	0,008 11	0,005 945

Za praktično računanje rabi se eksplicitna, aproksimativna Colebrookova formula

$$\lambda_g = 0{,}31/(\lg 0{,}143\, \mathrm{Re})^2.$$

U cijelom je praktično uporabnom području $Re = 5 \cdot 10^3 \ldots 10^8$ odstupanje $\approx \pm 1$ %.

b) *Prijelazno područje*, u kojem vrijedi Colebrookova formula

$$1/\sqrt{\lambda} = -2 \lg (0{,}269\, k/d + 2{,}51/Re \sqrt{\lambda})$$

praktično završava kod $Re \approx 400\, d/k \cdot \lg(3{,}715\, d/k) \approx 10^3\, d/k$.

Za praktično proučavanje rabi se eksplicitna, aproksimativna Pečornikova formula

$$\lambda = 0{,}25/[\lg(15/Re + 0{,}269\, k/d)]^2$$

koja vrijedi s maksimalnom pogrješkom od ≈ 6 % za $Re = 4 \cdot 10^3 \ldots 10^8$ i relativne hrapavosti $k/d = 10^{-2} \ldots 5 \cdot 10^{-6}$.

c) *Područje potpune hrapavosti* (koje obuhvaća vrijednosti) $Re > 400\, d/k \cdot \lg(3{,}715\, d/k)$, u kojemu određujemo λ_h po Nikuradseovoj formuli

$$\lambda_h = 0{,}25/[\lg(3{,}715\, d/k)]^2.$$

Vrijednosti λ_h za različite d/k:

d/k	10	40	60	100	200	500	1 000
λ_h	0,1014	0,0529	0,0453	0,0378	0,0303	0,0234	0,0196

*

S određenim ograničenjima ($k/d < 0{,}01$ i $\lambda < 0{,}05$) i s nešto manjom točnošću (± 5 %) vrijedi u području $Re = 4 \cdot 10^3 \ldots 10^7$ (dakle u svim područjima) Moodyjeva formula

$$\lambda = 5{,}5 \cdot 10^{-3} (1 + \sqrt[3]{2 \cdot 10^4\, k/d + 10^6/Re}).$$

U glatkom području je $k/d = 0$, dok je u potpuno hrapavom području $Re \approx \infty$ pa formula prelazi u oblik

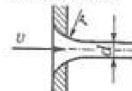
$$\lambda_h = 5{,}5 \cdot 10^{-3} + 0{,}15 \sqrt[3]{k/d}.$$

Apsolutne prosječne visine hrapavosti k (po Richteru)

Tvari i stanje cijevi	$\frac{k}{\text{mm}}$
Vučene cijevi od bakra, mjedi, bronce, aluminija, stakla, umjetnih tvari itd.	... 0,002
Vučene čelične cijevi (nove)	0,02 ... 0,10
– malo zahrđale	... 0,40
– jako inkrustirane.	... 3
Zavarene čelične cijevi (nove)	0,04 ... 0,10
– nove, prevučene bitumenom	≈ 0,05
– rabljene, jednoliko zahrđale	≈ 0,15
– nakon višegodišnje uporabe	≈ 0,5
– malo inkrustirane	≈ 1,5
– jako inkrustirane.	2 ... 4
Zakovane čelične cijevi (prema načinu izvedbe).	0,5 ... 10
Pocinčane čelične cijevi (nove).	0,07 ... 0,15
Cijevi od lijevanog željeza (nove)	0,25 ... 1
– nove, prevučene bitumenom	0,1 ... 0,15
– rabljene, malo zarhđale	1 ... 1,5
– inkrustirane.	1,5 ... 4
Drvene cijevi, nove (uporabom postaju glađe).	0,2 ... 1
Betonske cijevi (sirove)	1 ... 3
– zaglađene.	0,3 ... 0,8

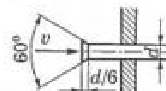
2. Faktor gubitaka ζ

Ulazna ušća



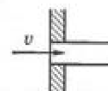
zaobljena

$r > 0{,}5\, d$, $\zeta = 0{,}05$



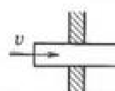
čunjasta (konfuzor)

$\zeta = 0{,}20$



oštra (sa stijenkom)

$\zeta = 0{,}50$

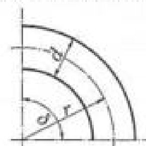


oštra (bez stijenke)

$\zeta = 1{,}00$

Kružni lukovi polumjera zakrivljenosti r, s kružnim ili kvadratnim presjekom i kutom skretanja $\delta = 90°$:

r/d	1,0	1,5	2	3	4	5	6	10
ζ	0,27	0,20	0,15	0,13	0,10	0,10	0,10	0,11

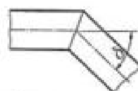


Navedeni ζ vrijede za tehnički glatke cijevi (npr. lim), dok za tehnički hrapave cijevi (npr. sivi lijev, ziđe i sl.) uzimamo dvostruke vrijednosti.

Za kutove $\delta = 0 \dots 180°$ treba vrijednosti za ζ množiti s faktorom n:

δ	30°	60°	90°	120°	150°	180°
n	0,4	0,7	1,0	1,3	1,5	1,7

Koljena



δ	15°	30°	45°	60°	90°	105°	120°
ζ_g	0,04	0,13	0,24	0,47	1,13	1,80	2,26
ζ_h	0,06	0,17	0,32	0,68	1,27	2,00	2,54

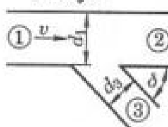
Vrijednosti ζ_g vrijede za glatke, a vrijednosti ζ_h za hrapave stijenke cijevi.

Izlazni otvori (otvori u stijenkama)



provrt u stijenki (oštri rubovi) $\zeta = 1{,}8$ | cilindrični nastavak $\zeta = 0{,}5$ | čunjasti nastavak $\zeta = 0{,}25$ | zaobljenje s nastavkom $\zeta = 0{,}1$

Odvojci



Obujamni protoci:

$q_{V1} = q_{V2} + q_{V3}$ – u dovodu 1

q_{V2} – u dovodu 2

q_{V3} – u odvojku 3.

Gubitci – u odvodu 2: $\Delta p_2 = \zeta_2\, \delta\, v^2/2$

– u odvojku 3: $\Delta p_3 = \zeta_3\, \delta\, v^2/2$

v – brzina u odvodu 1.

Odvojci jednakog kružnog presjeka ($d_1 = d_2 = d_3$)

q_{V3}/q_{V1}		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\delta = 90°$	ζ_2	0,05	−0,08	−0,04	0,07	0,21	0,35
	ζ_3	0,96	0,88	0,89	0,96	1,10	1,29
$\delta = 45°$	ζ_2	0,04	−0,06	−0,04	0,07	0,20	0,33
	ζ_3	0,90	0,66	0,47	0,33	0,29	0,35

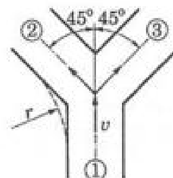
Odvojci jednakog kvadratnog presjeka

q_{V3}/q_{V1}		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\delta = 90°$	ζ_2	0,04	0,00	0,05	0,15	0,28	0,42
	ζ_3	0,91	0,75	0,70	0,74	0,79	0,84
$\delta = 45°$	ζ_2	0,10	0,03	0,05	0,14	0,29	0,49
	ζ_3	0,88	0,65	0,47	0,32	0,20	0,18

Račve (Y-komadi) s kružnim ili kvadratnim presjekom ploštine A

Obujamni protok u dovodu 1: q_V.

Gubitci: $\Delta p = \zeta\, \varrho\, v^2/2$.



Protok	ζ za oštre rubove	
	$A_1 = A_2 = A_3$	$A_2 = A_3 = 0{,}5\,A_1$
od 1 prema 2 i 3	0,55	0,75
od 1 prema 2; dok je 3 zatvoren	0,50	1,35
smanjenje ζ pri zaobljenju r za	≈ 40 %	≈ 40 %

ζ se odnosi na brzinu v u dovodu 1.

Sastavci

Obujamni protoci:

$q_{V1} = q_{V2} + q_{V3}$ – u odvodu 1

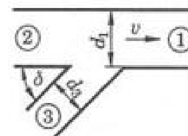
q_{V2} – u odvodu 2

q_{V3} – u priključku 3.

Gubitci – u dovodu 2: $\Delta p_2 = \zeta_2\, \varrho\, v^2/2$

– u priključku 3: $\Delta p_3 = \zeta_3\, \varrho\, v^2/2$

v – brzina u odvodu 1.

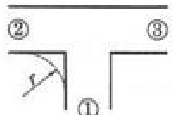


Sastavci jednakog kružnog presjeka ($d_1 = d_2 = d_3$)

q_{V3}/q_{V1}		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\delta = 90°$	ζ_2	0,06	0,18	0,30	0,40	0,50	0,60
	ζ_3	−1,04	−0,40	0,10	0,47	0,73	0,92
$\delta = 45°$	ζ_2	0,05	0,17	0,18	0,05	−0,20	−0,57
	ζ_3	−0,90	−0,37	0,00	0,22	0,37	0,38

Okomiti sastavci (T-komadi) kružnog ili kvadratnog presjeka A

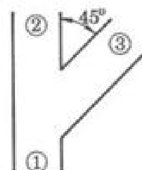
Protok	ζ za oštre rubove	
	$A_1 = A_2 = A_3$	$A_2 = A_3 = 0{,}5\,A_1$
od 2 prema 3; 1 zatv.	0,50	0,50
od 1 prema 2 i 3*	1,00	1,90
od 1 prema 2; 3 zatv.*	1,40	3,70
smanjenje ζ pri zaobljenju r za	≈ 20 %	≈ 60 %



* ζ vrijedi za brzinu v u dovodu 1.

Kosi cijevni priključci (45°) kružnog presjeka ploštine A pri sastavljanju odnosno razdvajanju tokova (približne vrijednosti):

Protok	ζ $A_1 = A_2 = A_3$
od 1 prema 2; 3 zatvoren	0,15
od 2 prema 1; 3 zatvoren	0,05
od 1 prema 3; 2 zatvoren	0,50
od 3 prema 1; 2 zatvoren	0,50
od 2 prema 3; 1 zatvoren	3,0
od 3 prema 2; 1 zatvoren	3,0

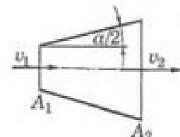


Promjene presjeka od ploštine A_1 na ploštinu A_2

Prijelaz okruglog presjeka u kvadratni (ili obratno) jednake ploštine

$$\zeta = 0{,}1 \dots 0{,}2.$$

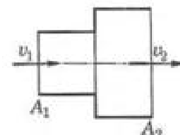
Postupno proširenje (difuzor) za kut proširenja $\alpha = 8 \dots 14°$



$\zeta_1 = (0{,}2 \dots 0{,}4)\,[1 - (A_1/A_2)^2]$

Gubitak se odnosi na brzinu v_1.

A_2/A_1	$\alpha = 10 \dots 15°$	$20 \dots 30°$
1,25 ... 1,75	$\zeta_1 =$ 0,05	0,15
2,00 ... 2,50	0,10	0,30



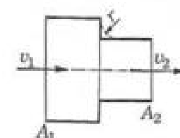
Naglo proširenje $\zeta_1 = (1 - A_1/A_2)^2$

A_1/A_2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ζ_1	1,00	0,64	0,36	0,16	0,04	0,00

Gubitak se odnosi na brzinu v_1.

Postupno suženje (konfuzor)

za kutove suženja α do 45° : $\zeta = 0$.



Naglo suženje za oštre rubove

A_2/A_1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ζ_1	9,4	1,8	0,9	0,34	0,25	0,16	0,10

Gubitak se odnosi na brzinu v_1.

Za pravilna zaobljenja (r) je: $\zeta = 0{,}05$.

Prigušnice i sapnice (v. str. 184)

Gubitci u prigušnici ili sapnici ovise o omjeru površine njezina otvora A_1 i površine cijevi A_2, a odnose se na brzinu u cijevi v

Prigušnice:	$m = A_1/A_2$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
	ζ	249	102	53	31	19	9	4

Sapnice:	$m = A_1/A_2$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
	ζ	81	16	5,4	2,25	1,0	0,44	0,18	0,06

Venturijeve sapnice:	$m = A_1/A_2$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
	ζ	17	7	3	2	1	0,5	0,3

Armature	ζ
Normalni ventili:	3,9
Poboljšani ventili:	2,5 ... 3,4
Ventili s nesmetanim prolazom (eliptični presjek):	0,6
Zaklopke (leptiraste) – otvorene:	0,2
Zasuni (pravilno izvedeni) – otvoreni:	0,05

Otpori gibanja u fluidu

Otpor gibanja tijela u fluidu (aerodinamički otpor) jest

$$F_r = C_r A\, p_k$$

gdje su: C_r brojčani faktor otpora, A ploština projekcije tijela na ravninu okomitu na smjer gibanja, p_k dinamički tlak.

Dinamički tlak pri gibanju tijela relativnom brzinom v u fluidu gustoće ϱ

$$p_k = \frac{1}{2}\varrho\, v^2.$$

Faktor otpora C_r

Predmet [1]			C_r
kružna ploča		–	1,11
dvije kružne ploče		$l/d = 1$ 1,5 2 3	0,93 0,78 1,04 1,52
kugla		$Re > (1{,}5 \ldots 4)\ 10^5$ $Re < (1{,}5 \ldots 4)\ 10^5$	0,09 ... 0,18 0,47
konveksna polukugla		bez dna s dnom	0,34 0,4
konkavna polukugla		bez dna s dnom	1,33 1,17
valjak		$Re < 9 \cdot 10^4$; $l/d = 1$ 2 5 10 40 ∞ $Re > 5 \cdot 10^5$; $l/d = \infty$	0,63 0,68 0,74 0,82 0,98 1,20 0,35
aerodinamički profil		$Re > 10^5$ $l/d = 2$ 3 5 10 20	0,2 0,1 0,06 0,083 0,094

[1] Strjelica na skici pokazuje smjer djelovanja otpora – suprotno smjeru relativne brzine tijela u fluidu.

HIDRAULIČNI STROJEVI

SISALJKE (PUMPE, CRPKE)

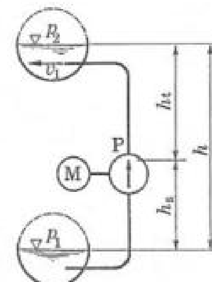
Sisaljke služe za prijenos kapljevina s nižega na viši položaj ili s nižega na viši tlak ili za oboje. Kadšto služe i tome da – posebnim uređajem (mlaznicom) – postignemo znatniju izlaznu brzinu iz cijevi (npr. brizgaljke).

Dobavna visina (napor)

Sisaljke povećavaju specifičnu energiju e (J/kg) kapljevine gustoće ϱ, od ulaza u sisaljku do izlaza iz nje. To povećanje energije redovito izražavamo visinom stupca crpljene kapljevine, a nazivamo je *dobavnom visinom* H

$$H = \frac{e}{g}$$

(g težno ubrzanje).



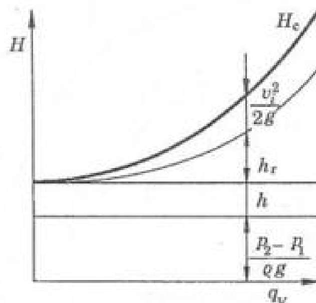
P sisaljka, M pogonski stroj

Potrebnu dobavnu visinu H određujemo karakteristikom priključenoga cijevnoga sustava H_c

$$H = H_c = \frac{p_2 - p_1}{\varrho g} + h + h_r + \frac{v_i^2}{2g}$$

gdje su: p_1 i p_2 tlakovi u usisnoj i tlačnoj posudi; $h = h_s + h_t$ ukupna geodetska (usisna i tlačna) visina, h_r gubitci u cijevnom sustavu; v_i izlazna brzina. (Ulazna je brzina zanemarena, dok je izlazna brzina katkad znatna, npr. pri brizgaljkama.)

Karakteristika cijevnog sustava mijenja se s protokom.



Povećanje specifične energije u sisaljci je

$$e = gH = \frac{p_2 - p_1}{\varrho} + g\,(h + h_r) + \frac{v_i^2}{2}.$$

Ako su tlakovi p_1 i p_2 jednaki zračnome p_a ($p_1 = p_2 = p_a$) – kao npr. pri brizgaljkama – vrijedi

$$e = g\,(h + h_r) + \frac{v_i^2}{2}.$$

Kad je izlazna brzina malena, zanemarujemo zadnji član.

Dopuštena usisna visina (geodetska) $h_{s\,dop}$ za kapljevine gustoće ϱ ovisi o tlaku p_1 (apsolutnom) u donjoj (usisnoj) posudi, tlaku p_t zasićene pare pri temperaturi tekućine t, gubitcima u usisnoj cijevi h_{rs} i o posebnim gubitcima h_p sisaljke (ovisnim o vrsti sisaljke)

$$h_{s\,dop} \le \frac{p_1 - p_t}{\varrho\, g} - h_{rs} - h_p\,.$$

Ako je donja posuda otvorena ($p_1 = p_a$), dopuštena geodetska usisna visina ovisi o zračnom tlaku p_a, koji se mijenja s nadmorskom visinom. Za vodu su tlačne visine zraka h_a (= $p_a/\varrho\, g$) u ovisnosti o nadmorskoj visini:

nadmorska visina H_{nmv}/m:	0	100	300	500	1000	2500
h_a/m:	10,3	10,2	9,9	9,7	9,2	7,7

Tlak zasićene pare p_t ovisi o vrsti kapljevine i njenoj temperaturi t.

Pri vodi je tlačna visina zasićene pare h_t (= $p_t/\varrho\, g$) u ovisnosti o temperaturi t

t/°C	5	10	20	50	80	100
h_t/m	0,09	0,12	0,24	1,26	4,83	10,33.

Gubitak tlaka u usisnoj cijevi računamo prema Darcyju (str. 169).

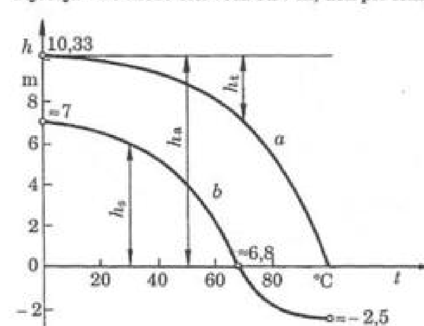
Posebni gubitci u sisaljci su ovisni:

– pri stapnim sisaljkama od otvaranja usisnog ventila i utjecaja usisnog vjetrenika,

– pri turbopumpama od pojave kavitacije.

Dijagramom je predočena usisna visina vode na površini mora u ovisnosti o temperaturi vode.

Geodetska usisna visina h_s pri temperaturi vode 15 °C – zbog navedenih utjecaja – ne može biti veća od 7 m, dok pri temperaturi od 70 °C voda mora pritjecati sisaljki. Lako hlapive kapljevine moraju uvijek pritjecati sisaljki. (Kod benzina, npr. time spriječavamo nastajanje lako upaljivih para!)



a teorijska krivulja, *b* stvarna krivulja

Snagu, potrebnu za pogon sisaljke, proračunavamo na temelju prirasta specifične energije e odnosno dobavne visine H. Za kapljevinu gustoće ϱ pri masenom protoku q_m odnosno obujamnom protoku q_V iznosi:

teorijska snaga: $P_0 = q_m e = q_m g H = q_V \varrho\, g H$

unutarnja snaga: $P_i = \dfrac{P_0}{\eta_i}$

efektivna snaga: $P = \dfrac{P_i}{\eta_m} = \dfrac{P_0}{\eta_i\, \eta_m}$

$$P = \frac{P_0}{\eta} = \frac{q_m e}{\eta} = \frac{q_m g H}{\eta} = \frac{q_V \varrho\, g H}{\eta}\,,$$

gdje su: η_i unutarnja korisnost, η_m mehanička korisnost, η efektivna korisnost

$$\eta = \eta_i \cdot \eta_m\,.$$

Korisnosti za različite vrste sisaljki i ventilatora za:

	η_i	η_m	η
stapne sisaljke:	0,90 ... 0,95	0,88 ... 0,95	0,80 ... 0,90
turbopumpe:	0,55 ... 0,90	0,95	0,60 ... 0,85
ventilatore:	–	–	0,50 ... 0,90.

Te korisnosti vrijede za najpovoljnije pogonske uvjete. Pri promjenljivim uvjetima djelovanja (promjenljiv protok, promjenljiva dobavna visina ili brzina vrtnje) korisnosti se mijenjaju, i to osobito znatno kod turbopumpi (v. str. 181).

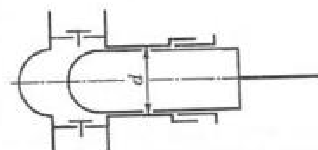
Stapne sisaljke

Stapne sisaljke nemaju negdanje značenje (male brzine), ali se rabe i nadalje za male dobave ili veoma visoke tlakove.

Obujamni je protok teorijski:

– pri jednoradnim stapnim sisaljkama promjera cilindra d, stapaja s i brzine vrtnje n

$$q_{V0} = \frac{\pi\, d^2}{4}\, s\, n$$



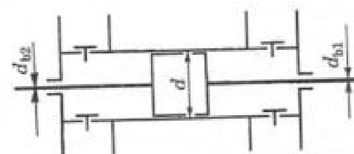
– pri dvoradnim sisaljkama s promjerima stapajice d_{b1} i d_{b2}

$$q_{V0} = \frac{\pi}{4}\,(2\, d^2 - d_{b1}^2 - d_{b2}^2)\, s\, n\,.$$

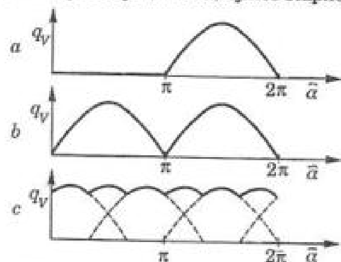
Dobava sisaljke, tj. stvarni obujamni protok q_V, iznosi zbog obujamnih gubitaka (pri stapu, ventilu itd.) samo

$$q_V = \lambda\, q_{V0}\,,$$

gdje je dobavni stupanj λ = 0,93 ... 0,98.



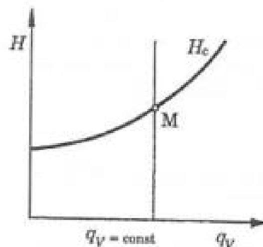
Dobava q_V pri stapnim je sisaljkama nejednolika. Ona se mijenja već prema položaju (kutu α) ojnice stapnog mehanizma.



Dobava q_V odgovara, prema sl. *a*, jednoradnoj stapnoj sisaljci; prema sl. *b* dvoradnoj, odnosno jednoradnoj, ali sa 2 cilindra (s ojnicama pod kutom od 180°).

Nejednoličnost stapnih sisaljki ublažava se vjetrenicima (zračnim komorama) ili većim brojem cilindara (npr. kod triju cilindara su ojnice međusobno razmaknute za 120°, sl. *c*).

Vjetrenici na usisnoj strani povećavaju usisnu visinu, a na tlačnoj strani su zaštita protiv hidrauličnog udara.



M radna točka

Brzina vrtnje stapnih pumpi iznosi 0,75 ... 4,7 s^{-1} (= 45 ... 280 min^{-1}).

Pri konstantnoj brzini vrtnje (i nepromijenjenom stapaju) dobava je konstantna.

Usisna visina h_s računa se pri stapnim pumpama do tlačnog ventila:

– pri pumpama s usisnim vjetrenikom

$$h_{s\,dop} \le \frac{p_1 - p_t}{\varrho g} - h_{rs} - h_V$$

gdje su: h_{rs} gubitak visine u usisnoj cijevi; h_V gubitak visine pri otvaranju usisnog ventila ($\approx$ 2 m);

– pri pumpama bez usisnog vjetrenika

$$h_{s\,dop} \le \frac{p_1 - p_t}{\varrho g} - \left(h_V + a\,n^2\,r\,l_s \frac{A}{A_s}\right)$$

gdje su: a = 4,82 s^2/m konstanta izmjera, n brzina vrtnje (s^{-1}), r radijus ojnice, l_s duljina usisne cijevi, A korisni presjek cilindra pumpe, A_s presjek usisne cijevi.

Turbopumpe

Turbopumpe su skupni naziv za radijalne i aksijalne (rotacijske) pumpe koje djeluju po Eulerovim zakonima za turbostrojeve.

U praksi se često sve turbopumpe (radijalne i aksijalne) nepravilno nazivaju »centrifugalnim« pumpama, iako su zapravo samo radijalne pumpe centrifugalne.

Brzohodnost n_q

$$n_q = \frac{n}{\sqrt{H}} \sqrt{\frac{q_V}{\sqrt{H}}}$$

pokazuje koju bi brzinu vrtnje morala imati geometrijski slična pumpa, izvedena za dobavnu visinu H (m), protok (dobavu) q_V (m^3/s) i brzinu vrtnje n, da bi pri dobavnoj visini H_1 = 1 m dobavljala q_{V1} = 1 m^3/s. (Prividna nekoherentnost jedinice u toj jednadžbi otpada, ako s simbolima H i q_V razumijemo bezdimenzijske omjere H/H_1 i q_V/q_{V1}.)

Sve geometrijski slične turbopumpe koje imaju slične protočne uvjete (geometrijski slične trokute brzina) imaju i jednaku brzohodnost. Ona je za različite turbopumpe,

radijalne: n_q = 0,23 ... 1,7 s^{-1} = 14 ... 100 min^{-1}

aksijalne (propelerne): n_q = 1,7 ... 10 s^{-1} = 100 ... 600 min^{-1}.

Manjoj brzohodnosti n_q odgovara manja brzina vrtnje, manji protok i veća dobavna visina.

Za visokotlačne sisaljke kojima je brzohodnost n_q < 0,23 s^{-1} (odn. < 14 min^{-1}), biramo sisaljke s više stupnjeva.

Karakteristike turbopumpi (i ventilatora)

Pri konstantnoj brzini vrtnje n dobavna visina H, korisnost η i za pogon sisaljke potrebna snaga P ovise o dobavi q_V (koju možemo mijenjati prigušivanjem).

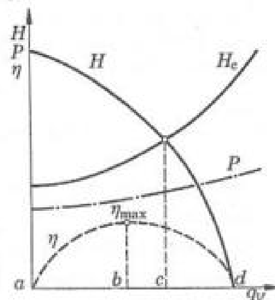
U dijagramu radijalne sisaljke H = (q_V) odgovaraju točke:

a – radu pri potpuno zatvorenom izlaznom otvoru (q_V = 0); sva se snaga pretvara u toplinu (porast temperature kapljevine!);

b – radu pri optimalnim uvjetima (η_{max});

c – stvarnom radu pri priključku pumpe na cjevovod ($H = H_c$);

d – radu na prazno (H = 0; samo teorijski!).



Pri promjeni brzine vrtnje od n_1 na n_2 mijenjaju se za jednu te istu sisaljku protok q_V, dobavna visina H i snaga P po zakonu afiniteta

$$\frac{q_{V1}}{q_{V2}} = \frac{n_1}{n_2} \qquad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \qquad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3.$$

Usisna visina h_s je vertikalna udaljenost osi pumpe (pri ulaznoj površini rotora) od površine kapljevine u usisnoj posudi (crpilištu).

Dopuštena usisna visina je

$$h_{s\,dop} \le \frac{p_1 - p_t}{\varrho g} - h_{rs} - \sigma H$$

gdje je kavitacijski koeficijent za pumpe (po Stepanovu) ovisan o brzohodnosti n_q (s^{-1})

$$\sigma \approx 0{,}287\, n_q^{\,4/3}$$

(Prividna nesuvislost u toj jednadžbi ne postoji, ako pod n_q razumijevamo bezdimenzijski omjer n_q/n_1, pri čemu je $n_1 = 1\ s^{-1}$.)

Turbopumpe redovito ne mogu same usisati tekućinu, već se mora usisna cijev napuniti tekućinom. Da bi usisna cijev i u razdoblju pogonskog prekida ostala napunjena tekućinom, ugrađuje se na njezinu dnu odbojni (»nožni«) ventil ili zaklopka. – Ima, međutim, i tzv. samousisnih sisaljki u kojih je prigrađen poseban uređaj za usisavanje tekućine i kad je usisna cijev napunjena zrakom.

Ventilatori

Ventilatori služe za transport plinova i para pa su zapravo sisaljke za plinove i pare u području njihove nestlačivosti.

Jer su turbostrojevi, pokoravaju se istim zakonima kojima i turbopumpe, samo što prirast specifične energije e, odnosno dobavna visina H obično izražavamo prirastom (»skokom«) tlaka (»naporom«) Δp

$$\Delta p = e\,\varrho = H\varrho g$$

gdje je ϱ gustoća dobavnog fluida.

Karakteristika cjevovoda Δp_c ($= H_c\,\varrho\,g$) načelno je jednaka onoj za pumpe s razlikom što, zbog male gustoće plinova, ne uzimamo u obzir geodetsku visinu h

$$\Delta p_c = p_2 - p_1 + \Delta p_r + \varrho \frac{v_1^2}{2}.$$

Ventilatore dijelimo također prema brzohodnosti na

radijalne: $n_q = 0{,}1\ ...\ 1{,}67\ s^{-1} = 6\ ...\ 100\ min^{-1}$

aksijalne (propelerne): $n_q = 1{,}17\ ...\ 10\ s^{-1} = 70\ ...\ 600\ min^{-1}$

Karakteristike ventilatora u načelu su slične karakteristikama turbopumpi (v. str. 181).

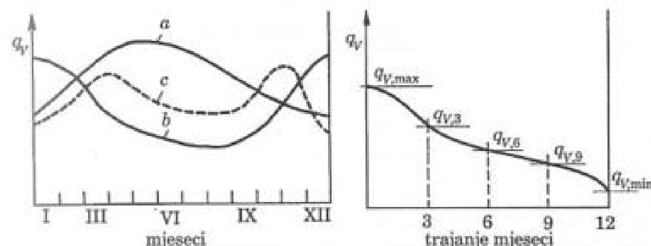
VODNE TURBINE

Vodna snaga P_0 dana je raspoloživim masenim protokom vode q_m ili obujamnim protokom vode q_V i korisnim padom H

$$P_0 = q_m g H = q_V \varrho g H$$

gdje je ϱ gustoća vode.

Protok je ovisan o karakteristici rijeke kojoj pripada određeno oborinsko područje. Visokogorske rijeke (a – npr. Drava) imaju najveći protok u kasno proljeće i rano ljeto, kad se u visokim planinama tope ledenjaci. Primorske rijeke (b – npr. Neretva) imaju najveći protok u doba zimskih kiša. Srednjogorske rijeke (c – npr. Sava) imaju po dva maksimuma – u proljeće i jesen.



Protok je ovisan i o vlažnosti godine (sušne i vlažne godine). Pri ocjenjivanju protoka uzimamo u obzir njegov prosjek kroz niz godina (npr. 35 godina).

Radi prosuđivanja rentabilnosti postrojenja i izbora turbine ustanovljujemo osim najvećeg i najmanjeg protoka ($q_{V,max}$ i $q_{V,min}$) još i protoke koji godišnje traju (ukupno) 3 mjeseca ($q_{V,3}$), 6 mjeseci ($q_{V,6}$) ili 9 mjeseci ($q_{V,9}$).

Nejednolikost protoka izravnavamo akumulacijom vode u vrijeme većeg protoka odnosno manjeg potroška. Akumulacija može biti dnevna ili tjedna (brane) ili godišnja (dolinske brane). U posebnim slučajevima viškom energije u vrijeme malog opterećenja crpimo vodu u visoko smještene akumulacijske bazene, da je odatle u vrijeme vršnog opterećenja iskorištavamo.

Korisni pad H ovisi o geodetskom padu h (tj. o razlici vodenih razina na najvišem mjestu i na izlazu iz turbinskog postrojenja) te o gubitcima h_r u dovodu (cjevovod, armature itd.)

$$H \approx h - h_r.$$

Točno određivanje raspoloživog pada H je, za razne vrste turbinskih postrojenja, definirano u međunarodnim propisima za primopredaju vodnih turbina.

Geodetski pad h mijenja se s promjenom protoka. Povećani protok uzrokuje porast vodenih razina, a osobito razine na izlazu, zbog čega se smanjuje geodetski pad. Pri razmjerno malom padu njegovo je smanjenje vrlo osjetljivo i može unatoč povećanom protoku prouzročiti smanjenje vodne snage P_0.

Snaga turbine

Teorijska snaga P_0 turbine jednaka je raspoloživoj vodnoj snazi

$$P_0 = q_m\, e = q_m g\, H = q_V\, \varrho\, g\, H$$

gdje je q_m, odnosno q_V znači maseni odnosno obujamni protok kroz turbinu.

Unutarnja snaga P_i smanjena je za unutarnje gubitke koje uzimamo u obzir unutarnjom korisnošću η_i

$$P_i = \eta_i\, P_0.$$

Unutarnja korisnost turbina (umnožak hidraulične korisnosti η_h i obujamne korisnosti η_V; $\eta_i = \eta_h\,\eta_V$) jako ovisi o njenoj brzini vrtnje pa je dobra samo pri određenim brzinama vrtnje (n'), za koje su izvedene turbinske lopatice.

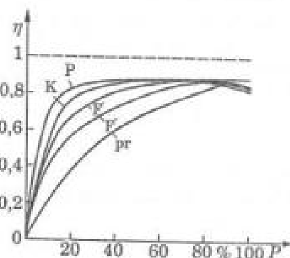
Efektivna snaga P smanjena je još za mehaničke gubitke (uključivši gubitke za pogon pomoćnih uređaja, regulatora itd.), što uzimamo u obzir mehaničkom korisnošću η_m odnosno efektivnom korisnošću $\eta = \eta_i \eta_m$

$$P = \eta_m P_i = \eta\, P_0 \qquad P = \eta\, q_m e = \eta\, q_m g\, H = \eta\, q_V\, \varrho\, g\, H$$

Efektivna korisnost turbina iznosi za:

manje turbine: $\eta = 0{,}75 \ldots 0{,}85$

veće turbine: $\eta = 0{,}85 \ldots 0{,}95$



Efektivna korisnost ovisi o promjeni opterećenja P, i to različito za različite turbine s raznovrsnim sustavom regulacije. Ovisnost $\eta = f(P)$ pri konstantnoj brzini vrtnje n predočena je dijagramom u kojem krivulje znače:

P Peltonove turbine

F′ sporohodne Francisove turbine

F″ brzohodne Francisove turbine

pr propelerne turbine

K Kaplanove turbine.

Brzohodnost turbina n_q

$$n_q = \frac{n}{\sqrt{H}} \sqrt{\frac{q_V}{\sqrt{H}}}$$

prikazuje kakvu bi brzinu vrtnje morala imati geometrijski slična turbina, građena za korisni pad H (m), protok q_V (m^3/s) i brzinu vrtnje n, pri korisnom padu $H_1 = 1$ m i protoku vode $q_{V1} = 1$ m^3/s.

(Koherentnost jedinica nije narušena ni ovdje ako pod znakovima H i q_V razumijevamo bezdimenzijske omjere H_1/H i q_V/q_{V1}.)

Ima li turbina više (i) sapnica (Peltonova turbina) ili više rotora na istoj osovini (Peltonova i Francisova turbina), bit će brzohodnost

$$n_{qi} = n_q \sqrt{i}.$$

Geometrijski slične vodne turbine imaju, uz slične protočne uvjete (slične »trokute brzina«), istu brzohodnost n_q.

Područja uporabe pojedinih vrsta vodnih turbina

Vrste turbina	$\frac{H}{\text{m}}$	$\frac{n_q}{\text{s}^{-1}}$	$\frac{n_q}{\text{min}^{-1}}$
Peltonove – s jednom sapnicom – s više sapnica	2000 ... 100	0,02 ... 0,16 0,08 ... 0,37	1,2 ... 9,5 5 ... 22
Francisove – sporohodne – srednje brzohodnosti – brzohodne	500 ... 105 105 ... 55 55 ... 35	0,33 ... 0,75 0,75 ... 1,17 1,17 ... 1,67	20 ... 45 45 ... 70 70 ... 100
propelerne Kaplanove	35 ... 5	1,67 ... 5,80	100 ... 350

Izbor turbine ograničen je kavitacijom. Brzohodnost n_q određuje se (na temelju dijagrama ispitivanja) u ovisnosti o minimalno dopuštenom faktoru kavitacije σ_{min} (Thominog broja)

$$n_q = f(\sigma_{min}) \qquad \sigma_{min} = (p_a/\varrho\, g - h_d)/H$$

gdje su: p_a zračni tlak, h_d visina difuzora.

Brzina vrtnje vodnih turbina prilagođuje se traženoj brzini vrtnje gonjenih strojeva. Redovito su to električni generatori koji imaju određenu brzinu vrtnje (vidi str. 266). Turbinu odabiremo tako da ima pri traženoj brzini vrtnje najbolju korisnost η.

Najveća brzina vrtnje n_{max}, koju turbina može postići u slučaju potpunog rasterećenja i potpuno otvorenih privodnih lopatica (»pobjegnuće«) mnogo je veća od normalne brzine vrtnje n i ona je:

pri Peltonovim turbinama $n_{max} = (1,8 ... 1,9)n$
pri Francisovim turbinama $n_{max} = (1,8 ... 2,1)n$
pri Kaplanovim turbinama $n_{max} = (2,3 ... 3,0)n$

Pri normalnom se radu brzina vrtnje turbine po pravilu ne smije povećati više od 10 %. Regulator koji pravilno djeluje mora spriječiti da se pri normalnom radu brzina vrtnje turbine poveća iznad dopuštene vrijednosti. Međutim, svi rotirajući dijelovi turbine i priključenih strojeva moraju, radi sigurnosti u slučaju pogrješke na regulatoru, izdržati i najveću brzinu vrtnje n_{max}.

TOPLINA

Specifični toplinski kapacitet

Diferencijal topline dQ mijenja tijelu mase m temperaturu za diferencijal dT pa je

$$dQ = c\, m\, dT$$

c je specifični toplinski kapacitet tijela J/kg K. U idealnih je plinova u najjednostavnijem slučaju – konstantna, inače općenito ovisi o temperaturi i o tlaku.

Smatramo li c konstantnim, pišemo

$$Q = c\, m\, (T_2 - T_1).$$

Vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta pojedinih tvari razabiru se iz tablica na str. 193 i 245 ... 250.

Pri promjenljivom toplinskom specifičnom kapacitetu računamo katkada sa »srednjim toplinskim specifičnim kapacitetom« između temperatura T_1 i T_2

$$c_{med} = \int_{T_1}^{T_2} c\, dT/(T_2 - T_1)$$

Sa srednjim toplinskim specifičnim kapacitetom računamo kao da je konstantan.

Entalpija je određena izrazom $H = U + pV$.

U tom je izrazu U unutarnja energija, a pV vanjska energija (energija prostora, p tlak, V obujam).

»Specifična entalpija h« je definirana kvocijentom entalpije H i mase m ($h = H/m$), računana po želji odabranim ishodištem (npr. 0 °C), gdje je $h = 0$, a iskazuje se jedinicom J/kg. Vrijednosti specifične entalpije za pare predočene su u tablicama na str. 199 ... 229, a za vlažni zrak na str. 232.

Toplinska raztezljivost (dilatacija)

Toplinsko rastezanje zbog povišenja temperature za dT

$$dl = \alpha_l\, l_0\, dT$$

gdje su: α_l koeficijent toplinskog rastezanja 1/K, l_0 prvobitna duljina.

Smatramo li da je koeficijent α_l konstantan, vrijedi

$$l = l_0\, [1 + \alpha_l\, (T - T_0)].$$

Koeficijent toplinskog rastezanja α_l pri višim temperaturama raste. Njegove su vrijednosti za krute tvari predočene na str. 188 i 189.

Toplinska širivost zbog povećanja temperature za dT je

$$dV = \alpha_V\, V_0\, dT$$

gdje su: α_V koeficijent toplinskog širenja, V_0 prvobitni obujam.

Smatramo li koeficijent α_V konstantnim, bit će

$$V = V_0 [1 + \alpha_V (T - T_0)].$$

I koeficijent toplinskog širenja α_V pri višim temperaturama raste. Njegove su vrijednosti za kapljevine i plinove predočene na str. 189.

Koeficijent toplinskog rastezanja α_l (vrijednosti iskazane jedinicom 1/K)

Tvar	Temperaturna područja		
	0 ... 100 °C	0 ... 500 °C	0 ... 1 000 °C
	$\frac{\alpha_l}{1/K}$	$\frac{\alpha_l}{1/K}$	$\frac{\alpha_l}{1/K}$
Kovine:			
aluminij	0,000 023 8	0,000 027 4	–
bakar	0,000 016 5	0,000 018 1	–
cink	0,000 016 5	–	–
iridij	0,000 006 5	–	–
kadmij	0,000 036 0	–	–
kobalt	0,000 013 0	–	–
kositar	0,000 026 7	–	–
krom	0,000 008 4	–	–
magnezij	0,000 026 0	0,000 029 8	–
mangan	0,000 022 8	–	–
molibden	0,000 005 2	–	–
nikal	0,000 013 0	0,000 015 2	0,000 016 8
olovo	0,000 029 2	–	–
platina	0,000 009 0	0,000 009 5	0,000 010 2
srebro	0,000 019 7	0,000 020 9	–
volfram	0,000 004 5	0,000 004 5	0,000 004 6
zlato	0,000 014 2	0,000 015 2	–
željezo (čisto)	0,000 012 3	–	–
Slitine:			
bronca (kositrena)	0,000 018 0	–	–
crveni lijev	0,000 019 0	–	–
čelik – neleg. 0,1 % C	0,000 012 0	0,000 014 1	–
0,6 % C	0,000 011 7	0,000 013 8	–
– legir. CrNi	0,000 011 5	–	–
18 Cr 8 Ni	0,000 016 0	–	–
13 % Cr	0,000 010 5	–	–
– invar (36 % Ni)	0,000 001 5	0,000 003 4	–
duralumin	0,000 023 5	0,000 027 3	–
konstantan	0,000 015 2	0,000 016 8	–
manganin	0,000 017 5	0,000 019 4	–
mjed (mesing)	0,000 018 4	–	–
novo srebro	0,000 018 0	–	–
platina-iridij (10 % Ir)	0,000 009 0	0,000 009 5	0,000 010 2
silumin	0,000 022 0	–	–
sivi lijev	0,000 010 4	0,000 012 9	–
tvrde kovine	0,000 005 5	–	–

Koeficijent toplinskog rastezanja α_l (vrijednosti iskazane jedinicom 1/K) (*konac*)

Tvar	Temperaturna područja		
	0 ... 100 °C	0 ... 500 °C	0 ... 1 000 °C
	$\frac{\alpha_l}{1/K}$	$\frac{\alpha_l}{1/K}$	$\frac{\alpha_l}{1/K}$
Nekovine:			
beton	0,000 012	–	–
celuloid	0,000 101	–	–
dijamant	0,000 001 3	–	–
grafit	0,000 002	–	–
granit	0,000 006	–	–
korund	0,000 006 4	0,000 007 2	0,000 008 2
magnezija (MgO)	0,000 012 3	0,000 012 6	0,000 013 9
opeka	0,000 008	–	–
poliamidi	0,000 110	–	–
polivinilklorid	0,000 080	–	–
porculan	0,000 003 0	0,000 003 6	0,000 004 3
staklo (jensko)	0,000 003 5 ...	0,000 004 0 ...	–
	... 0,000 008 1	... 0,000 009 3	–
(kremeno)	0,000 000 5	0,000 000 6	0,000 000 5
sumpor	0,000 090	–	–

Koeficijent toplinskog širenja α_V (vrijednosti iskazane jedinicom 1/K)

Kapljevina		$\frac{\alpha_V}{1/K}$	Kapljevina	$\frac{\alpha_V}{1/K}$
voda	0 °C	– 0,000 060	benzin	0,001 200
	10 °C	0,000 200	benzen (benzol)	0,000 106
	20 °C	0,000 380	etanol (alkohol)	0,001 150
	60 °C	0,000 540	ulje za mazanje	0,000 740
	100 °C	0,000 780	pentan	0,000 160
	200 °C	0,000 550	propantriol (glicerin)	0,000 520
			terpentinsko ulje	0,000 097
			transformatorsko ulje	0,000 690
			živa	0,000 180

Plin	$\frac{\alpha_V}{1/K}$	Plin	$\frac{\alpha_V}{1/K}$
amonijak	0,003 802	ugljični dioksik	0,003 726
argon	0,003 676	ugljični monoksid	0,003 670
dušik	0,003 674	vodik	0,003 662
helij	0,003 660	sumporni dioksid	0,003 850
kisik	0,003 674	idealni plin	0,003 661
neon	0,003 661		

Prvi glavni zakon termodinamike

»Toplina je ekvivalentna mehaničkom radu.« (Mayer, 1842.; Joule, 1843.)

Dovođenje ili odvođenje topline Q uzrokuje promjenu unutarnje energije U i mehaničkog rada W (dobivenog ili utrošenog), odnosno promjenu entalpije H i tehničkog rada W_{teh} (dobivenog ili utrošenog):

$\delta Q = \mathrm{d}U + \delta W$ $\quad + \delta Q$ = dovedena toplina

$\delta \Phi = \mathrm{d}H + \delta W_{teh}$ $\quad - \delta \Phi$ = odvedeni toplinski tok

Pri mehaničkoj ravnoteži možemo rad izraziti tlakom p i obujmom V:

$\delta W = p\,\mathrm{d}V$ $\quad +\delta W, +\delta W_{teh}$ = dobiveni rad

$\delta W_{teh} = -V\mathrm{d}p$ $\quad -\delta W, -\delta W_{teh}$ = utrošeni rad

Entalpijski teorem: $H_2 - H_1 = \Phi - W_{teh}$

Drugi glavni zakon termodinamike

»Toplina ne prelazi nikada sama od sebe s hladnijega na toplije tijelo.« (Clausius, 1850.; Thomson, 1851.).

Po tome razlikujemo:

a) povratne procese, tj. one koji su mogući u jednom ili drugom smislu, a da pri povratku ne ostane u prirodi nikakav trag (npr. isparivanje i kondenzacija, kompresija i ekspanzija itd.), i

b) nepovratne procese, koji su mogući samo u jednom smislu (npr. prijelaz topline, trenje, prigušivanje, miješanje itd).

Entropija je za sve povrative procese određena izrazom $\mathrm{d}S = \delta Q/T$. U tom je izrazu δQ promjena topline pri termodinamičkoj temperaturi T.

»Specifična entropija s« je definirana kvocijentom entropije S i mase m ($s = S/m$), računana po želji odabranim ishodištem (npr. = °C), gdje je $s = 0$, a iskazuje se jedinicopm J/(kg K). Njene vrijednosti za pare dane su na str. 199 ... 221.

Entropija se izoliranog sustava pri svim nepovratnim procesima povećava ($\mathrm{d}S > 0$).

*Eksergija** E je maksimalni tehnički rad što ga s obzirom na stanje okolice (pri temperaturi T_0 i tlaku p_0) možemo dobiti iz struje tvari kojoj je entalpija H i entropija S: $E = H - H_0 - T_0(S - S_0)$.

H_0 je entalpija, a S_0 entropija tvari pri stanju okolice (T_0, p_0).

*Anergija** $T_0(S - S_0)$ je dio energije iz kojeg ne možemo dobiti tehnički rad.

»Specifična eksergija e« je definirana kvocijentom eksergije E i mase m ($e = E/m$) ili jednadžbom $e = h - h_0 - T_0\ (s - s_0)$, gdje su: h specifična entalpija i s specifična entropija tvari u promatranom stanju, h_0 i s_0 su specifična entalpija i entropija tvari pri tlaku i temperaturi okolice, »specifična anergija« $b = T_0(s - s_0)$.

* Taj je naziv uveo prof. Z. Rant, Ljubljana (SV 1955/1 i SV 1962/1-2).

Promjene stanja tvari

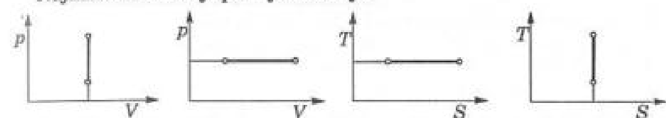
Pri promjeni stanja određujemo uglavnom: obujam V, tlak p, temperaturu T, mehanički rad W, odn. tehnički rad W_{teh} i toplinu Q.

U pV dijagramu predočeni su: mehanički rad W površinom ispod krivulje promjene stanja, a tehnički rad W_{teh} površinom lijevo od te krivulje

$W = \int p\,\mathrm{d}V \quad W_{teh} = -\int V\,\mathrm{d}p.$

U TS dijagramu predočena je toplina Q površinom ispod krivulje povrative promjene stanja $Q = \int T\mathrm{d}S$.

Najkarakterističnije promjene stanja:



izohora V = const izobara p = const izoterma T = const izentropa S = const

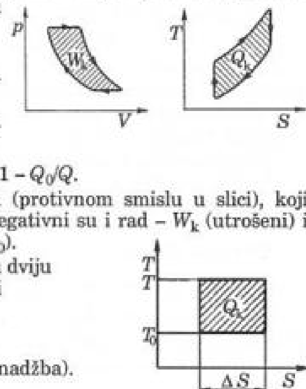
Adijabata znači promjenu stanja pri kojoj se sustavu toplinu niti dovodi niti odvodi. Ako je pri tom još ispunjen i ravnotežni (povrativi) tijek promjene stanja sustava, tada su adijabata i izentropa identične. Ili kraće, izentropa je ravnotežna adijabata.

Kružni procesi

U idealnom (bez gubitaka i sl.) desnokretnom kružnom procesu (tj. u smislu kazaljke na satu, v. sliku!), koji odgovara procesu pogonskih strojeva, površina omeđena zatvorenim krivuljama povrativih promjena stanja predstavlja: u pV dijagramu dobiveni rad W_k, u TS dijagramu razliku toplina Q_k:

$$W_k = Q_k = Q - Q_0,$$

gdje je Q dovedena, a Q_0 odvedena toplina ($Q > Q_0$).



Termički je stupanj djelovanja kružnog procesa

$$\eta_k = W_k/Q = 1 - Q_0/Q.$$

U lijevokretnom kružnom procesu (protivnom smislu u slici), koji odgovara procesu toplinskih pumpi, negativni su i rad $- W_k$ (utrošeni) i razlika toplina $- Q_k$ (dobivena) ($Q < Q_0$).

Carnotov kružni proces teče između dviju izentropa i dviju izoterma. Za nj vrijedi

$$Q_k = (T - T_0)\,\Delta S$$

a termički je stupanj djelovanja

$$\eta = 1 - T_0/T \quad \text{(Thomsonova jednadžba).}$$

IDEALNI PLINOVI

Pod »idealnim plinovima« razumijevamo visokopregrijane pare koje se pokoravaju Boyleovu i Mariotteovu zakonu (pV = const pri T = const) te Gay-Lussacovu zakonu (V/T = const pri p = const). U prirodi nema idealnih plinova, no mnogi im se realni plinovi svojim svojstvima približu-ju i navedeni zakoni za njih vrijede s dovoljnom točnošću.

Tehnički osobito važni realni plinovi jesu:

jednoatomni: He, Ar
dvoatomni: H_2, N_2, O_2, CO, zrak
višeatomni: CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_2H_6.

Pri malom tlaku i pogotovu još pri visokoj temperaturi možemo zakone idealnih plinova primijeniti i na H_2O, CO_2, SO_2, NH_3 itd.

Jednadžba stanja plina povezuje tlak p, gustoću ϱ, odnosno specifični obujam v ili obujam V te masu m i temperaturu T:

$$p/\varrho = R\,T \qquad p\,v = R\,T \qquad p\,V = m\,R\,T$$

R je *plinska konstanta* ovisna samo o sastavu plina a predočuje se jedinicom J/(kg K). Vrijednost za R – v. str. 192.

Opća plinska konstanta (umnožak molarne mase M i plinske konstante R) jednaka je za sve plinove:

$$R_m = M\,R = 8\,314{,}510 \text{ J/(kmol K)}.$$

Avogadrov zakon. 1 kmol bilo kojeg (idealnog) plina zauzima pri jednakom stanju uvijek isti obujam V_m, koji je pri 0 °C i tlaku 1,013 25 bar

$$V_m = R_m T/p = 22{,}413\,6 \text{ m}^3/\text{kmol}.$$

Za sve plinove (molarne mase M i gustoće ϱ) vrijedi $V_m = M/\varrho$, a za plinove među sobom $M_1/M_2 = \varrho_1/\varrho_2$.

Specifični toplinski kapacitet plinova

izobarski: pri konstantnom tlaku $c_p = \mathrm{d}h/\mathrm{d}T$
izovolumetrički: pri konstantnom obujmu $c_V = \mathrm{d}u/\mathrm{d}T$

gdje su: $\mathrm{d}h$ diferencijalna promjena specifične entalpije, $\mathrm{d}u$ diferencijalna promjena specifične unutarnje energije ($u = U/m$), $\mathrm{d}T$ diferencijalna promjena temperature.

Omjer specifičnih toplinskih kapaciteta: $\varkappa = c_p/c_V$
Razlika specifičnih toplinskih kapaciteta: $c_p - c_V = R$
$c_p = \varkappa R/(\varkappa - 1)$ $\qquad c_V = R/(\varkappa - 1)$

Entalpija plinova

specifična entalpija: $h = \int c_p\,\mathrm{d}T + C$

molarna entalpija: $H_m = M \int c_p\,\mathrm{d}T + C$

Podatci o molarnoj entalpiji H_m najpoznatijih plinova predočeni su na str. 194. Iz molarne se entalpije vrlo lako može izračunati specifična entalpija $h = H_m/M$.

Toplinska svojstva nekih plinova

Vrelište i kritično stanje nekih plinova

Plin	Kemijski znak	Vrelište (pri 1,013 25 bar) t_v / °C	Veličine kritičnog stanja: temperatura t_k / °C	tlak p_k / bar	gustoća ϱ_k / kg/m³
helij	He	–268,9	–267,9	2,28	69
argon	Ar	–185,9	–122,4	48,7	531
vodik	H_2	–252,8	–239,3	13,0	31
dušik	N_2	–195,8	–147,1	33,9	311
kisik	O_2	–183,0	–118,8	50,4	430
zrak	–	–194,0	–140,7	37,7	310
ugljični monoksid	CO	–191,5	–140,2	34,9	301
ugljični dioksid	CO_2	–78,5	+31,0	73,6	460
sumporni dioksid	SO_2	–10,0	+157,3	78,9	524
amonijak	NH_3	–33,4	+132,4	113,0	235
etin (acetilen)	C_2H_2	–83,6	+35,7	63,5	231
metan	CH_4	–161,7	–83,0	46,3	162
monoklormetan	CH_3Cl	–24,0	+143,1	66,8	370
difluordiklormetan	CF_2Cl_2	–30,0	+111,5	40,1	555
eten (etilen)	C_2H_4	–103,5	+9,3	51,4	216
etan	C_2H_6	–88,6	+35,0	49,6	210

Plinska konstanta, specifični toplinski kapacitet i gustoća

Plin	Broj atoma u molekuli	Molarna masa M / kg/kmol	Plinska konstanta R / J/(kg K)	Specifična topl. kap. c_p / J/(kg K)	$\varkappa = \frac{c_p}{c_V}$ [1]	Gustoća [2] ϱ_0 / kg/m³
He	1	4,003	2 078	5 237	1,66	0,178 5
Ar	1	39,94	208,2	523	1,66	1,783 4
H_2	2	2,016	4 122	14 245	1,41	0,089 9
N_2	2	28,02	296,7	1 038	1,40	1,250 5
O_2	2	32,00	259,8	913	1,40	1,429 0
zrak	–	28,96	287,0	1 005	1,40	1,292 8
CO	2	28,01	296,9	1 042	1,40	1,250 0
CO_2	3	44,01	188,8	820	1,30	1,976 8
SO_2	3	64,06	129,8	607	1,27	2,926 5
NH_3	4	17,03	488,2	2 055	1,31	0,771 3
C_2H_2	4	26,04	319,6	1 511	1,26	1,170 9
CH_4	5	16,04	518,7	2 156	1,32	0,716 8
CH_3Cl	5	50,49	164,7	737	1,29	2,308 4
CF_2Cl_2	5	120,9	68,8	561	1,14	5,083 0
C_2H_4	6	28,05	296,7	1 612	1,25	1,260 4
C_2H_6	8	30,07	276,7	1 729	1,20	1,356 0

[1] Pri 0 °C., [2] Pri 0 °C i 1,013 25 bar.

Molarna entalpija H_m nekih plinova pri stalnom tlaku $p = 0$ bar i temperaturi t °C (bez obzira na disocijaciju)

Temperatura $\frac{t}{°C}$	H_2 $\frac{H_m}{kJ/kmol}$	N_2 $\frac{H_m}{kJ/kmol}$	O_2 $\frac{H_m}{kJ/kmol}$	Zrak $\frac{H_m}{kJ/kmol}$
0	0	0	0	0
100	2 897	2 918	2 951	2 913
200	5 819	5 860	5 982	5 865
300	8 765	8 845	9 113	8 858
400	11 690	11 880	12 360	11 920
500	14 630	14 970	15 680	15 040
600	17 610	18 110	19 070	18 260
700	20 620	21 320	22 520	21 480
800	23 630	24 610	26 030	24 830
900	26 690	27 960	29 570	28 210
1 000	29 790	31 360	33 150	31 620
1 100	32 970	34 790	36 750	35 080
1 200	36 140	38 260	40 390	38 570
1 300	39 380	41 760	44 040	42 070
1 400	42 660	45 290	47 720	45 630
1 500	45 960	48 810	51 450	49 190
1 750	54 380	57 770	60 860	58 190
2 000	63 040	66 810	70 410	67 330
2 500	80 960	85 190	89 890	85 330
3 000	99 500	103 730	109 900	104 600

Temperatura $\frac{t}{°C}$	CO $\frac{H_m}{kJ/kmol}$	CO_2 $\frac{H_m}{kJ/kmol}$	SO_2 $\frac{H_m}{kJ/kmol}$	H_2O $\frac{H_m}{kJ/kmol}$
0	0	0	0	0
100	2 918	3 839	4 077	3 361
200	5 860	8 079	8 498	6 798
300	8 866	12 630	13 210	10 320
400	11 920	17 410	18 150	13 960
500	15 050	22 500	23 250	17 730
600	18 260	27 700	28 510	21 600
700	21 520	33 060	33 840	25 610
800	24 870	38 490	39 250	29 770
900	28 250	44 080	44 750	34 060
1 000	31 690	49 690	50 270	38 340
1 100	35 170	55 460	55 840	42 900
1 200	38 690	61 240	61 450	47 470
1 300	42 240	67 060	67 100	52 130
1 400	45 750	72 920	72 710	56 970
1 500	49 310	78 860	78 360	61 790
1 750	58 310	93 720	94 810	74 340
2 000	67 440	100 400	106 900	87 150
2 500	85 940	139 100	139 000	113 800
3 000	104 500	169 700	164 500	141 000

Povrative promjene stanja plinova

Oznake veličina – na str. 187 ... 192.

a) Izohora $V = \text{const}$ $\quad p/T = \text{const} \; (= m\,R/V)$ $\quad p_1/p_2 = T_1/T_2$

Mehanički rad: $W = 0$

Tehnički rad: $W_{teh} = V\,(p_1 - p_2)$

Toplina: $Q = m\,c_V\,(T_2 - T_1) = m\,\frac{R}{\varkappa - 1}\,(T_2 - T_1) = \frac{V}{\varkappa - 1}\,(p_2 - p_1)$

b) Izobara $p = \text{const}$ $\; V/T = \text{const} \; (= mR/p)$ (Gay-Lussacov zakon)

$V_1/V_2 = \varrho_2/\varrho_1 = T_1/T_2$

Mehanički rad: $W = p(V_2 - V_1) = m\,R(T_2 - T_1)$

Tehnički rad: $W_{teh} = 0$

Toplina:

$$Q = m\,c_p\,(T_2 - T_1) = m\,\frac{\varkappa R}{\varkappa - 1}\,(T_2 - T_1) = \frac{\varkappa\,p}{\varkappa - 1}\,(V_2 - V_1) = \frac{\varkappa}{\varkappa - 1}\,W$$

c) Izoterma $T = \text{const}$

$pV = \text{const} \; (= m\,RT)$ (Boyleov i Mariotteov zakon)

$p_1V_1 = p_2V_2$

Mehanički rad: $W = p_1V_1 \ln\frac{V_2}{V_1} = p_1V_1 \ln\frac{p_1}{p_2} = mRT\ln\frac{V_2}{V_1} = mRT\ln\frac{p_1}{p_2}$

Tehnički rad: $W_{teh} = W$

Toplina: $Q = W = T\,(S_2 - S_1) = m\,T\,(s_2 - s_1)$

d) Izentropa $S = \text{const}$

$$pV^{\varkappa} = \text{const} \qquad TV^{\varkappa-1} = \text{const} \qquad T\left(\frac{1}{p}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}} = \text{const}$$

$$\text{Mehanički rad: } W = \frac{p_1\,V_1}{\varkappa - 1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}\right] = \frac{p_1\,V_1}{\varkappa - 1}\left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\varkappa-1}\right]$$

$$= \frac{p_1\,V_1}{\varkappa - 1}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = \frac{1}{\varkappa - 1}\,(p_1V_1 - p_2V_2)$$

$$= \frac{m\,R}{\varkappa - 1}\,(T_1 - T_2) = m\,c_V\,(T_1 - T_2)\,.$$

Tehnički rad pri izentropskoj promjeni stanja (= teorijski rad toplinskih strojeva) $W = \varkappa\,W = m\,c_p\,(T_1 - T_2) = H_1 - H_2 = m\,(h_1 - h_2)$.

Toplina: $Q = 0$

$$\text{Konačna temperatura: } T_2 = T_1 - \frac{h_1 - h_2}{c_p} = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}$$

e) Politropa je općenita promjena stanja pri kojoj je promjena temperature upravno razmjerna dovedenoj ili odvedenoj toplini $\delta Q = m\,c\,\mathrm{d}T$

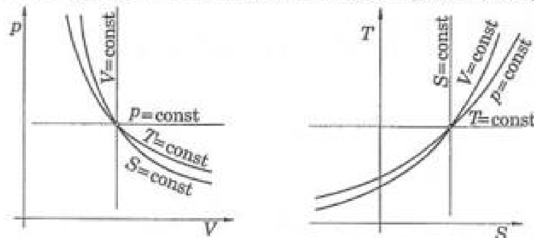
$$pV^n = \text{const} \qquad n = \frac{c - c_p}{c - c_V} \qquad c = c_V \frac{n - \varkappa}{n - 1}.$$

Mehanički rad:
$$W = \frac{p_1 V_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] = \frac{p_1 V_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}\right]$$
$$= \frac{p_1 V_1}{n-1}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = \frac{1}{n-1}(p_1 V_1 - p_2 V_2)$$
$$= \frac{m\,R}{n-1}(T_1 - T_2).$$

Tehnički rad: $W_{teh} = n\,W$ Toplina: $Q = \dfrac{\varkappa - n}{\varkappa - 1} W.$

Konačna temperatura: $T_2 = T_1 = \dfrac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{m\,R} = T_1 \left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$

Promjena stanja po politropi, kao općenita, obuhvaća sve prije navedene povrative promjene stanja koje su samo njezini posebni slučajevi.



Usporedba politropa:

politropa		n	c
izohora	V = const	$\pm\infty$	c_V
izobara	p = const	0	c_p
izoterma	T = const	1	$\pm\infty$
izentropa	S = const	$\varkappa = c_p/c_V$	0

Prigušivanje je nepovrativa promjena, kod koje pri adijabatskom slučaju i uz zanemarenje promjene kinetičke energije struje, vrijedi da je entalpija dovoljno daleko prije mjesta prigušenja jednaka entalpiji dovoljno daleko nakon mjesta prigušenja, tj. vrijedi $h_1 = h_2$.

U adijabatskom prigušenju idealnih plinova je $T_1 = T_2$.

Smjese idealnih plinova

(Indeksima 1, 2 ... n označujemo veličine koje pripadaju pojedinim sastavinama u smjesi.)

masa smjese $m = m_1 + m_2 + \ldots$
obujam smjese $V = V_1 + V_2 + \ldots$
tlak smjese $p = p_1 + p_2 + \ldots$

$p_1, p_2 \ldots$ su parcijalni tlakovi pojedinih plinova u smjesi (Daltonov zakon)

$$p_1 = pV_1/V \qquad p_2 = pV_2/V.$$

Za smjesu plinova vrijedi ista jednadžba stanja kao i za homogene plinove

$$p\,V = m\,R\,T.$$

Plinska konstanta smjese R i prividna molarna masa smjese M

$$R = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{m} R_i \qquad M = \sum_{i=1}^{n} \frac{V_i}{V} M_i.$$

Gustoća smjese: $\varrho = \sum_{i=1}^{n} \dfrac{V_i}{V} \varrho_i.$

Specifični toplinski kapaciteti i specifična entalpija smjese:

$$c_p = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{m} c_{pi}, \qquad c_V = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{m} c_{Vi} \qquad h = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{m} h_i.$$

Zrak

Sastav potpuno suhog zraka

Sastavina	N_2	O_2	Ar	CO_2	H_2	He + Ne + Kr + Xe
obujamni %	78,03	20,99	0,93	0,03	0,01	0,01
maseni %	75,47	23,20	1,28	0,046	0,001	0,003

Miješanje plinova (nepovratni proces)

a) Miješanje pri V = const
parcijalni tlak $p' = (p_1 V_1/T_1) \cdot T/V$ temperatura smjese
tlak smjese $p = p' + p'' + \ldots$ $T = \sum_{i=1}^{n} m_i c_{Vi} T_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} m_i c_{Vi}$

b) Miješanje pri p = const
parcijalni obujam $V' = (p_1 V_1/T_1).\ T/p$ temperatura smjese
protočni obujam smjese $q_V = \dfrac{q_m R T}{p}$ $T = \sum_{i=1}^{n} q_{mi} c_{pi} T_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} q_{mi} c_{pi}$

PARE

Zasićena para je smjesa dviju faza: kapljevite i plinovite. Para ima u zasićenom stanju za svaku temperaturu točno određenu vrijednost tlaka.

Omjer mase plinovite faze (suhe pare) i mase cjelokupne smjese (suhe pare i kapljevine) nazivamo »sadržaj pare x«. S obzirom na x zasićena je para:

$x = 0$ – vrela kapljevina (bez pare)

$0 < x < 1$ – mokra para, koja u jedinici mase sadrži x dijelova suhe pare i $(1 - x)$ dijelova vrele kapljevine

$x = 1$ – suhozasićena para (samo para, bez vrele kapljevine).

Različite veličine stanja pare, napose gustoću ϱ, specifični obujam v, specifičnu entalpiju h i specifičnu entropiju s označujemo:

pri stanju $x = 0$ oznakom $'$ pri stanju $x = 1$ oznakom $''$.

Temperatura, odgovarajući tlak i ostale veličine pri stanju $x = 0$ i $x = 1$ za najvažnije pare predočene su u tablicama na str. 202 ... 204 i 218 ... 221.

Za mokru paru ($0 < x < 1$) vrijedi:

specifični obujam $v_x = v' + x\,(v'' - v')$

specifična entalpija $h_x = h' + x\,(h'' - h')$

specifična entropija $s_x = s' + x\,(s'' - s')$.

Clapeyronova jednadžba prikazuje toplinu isparivanja r kao funkciju temperature zasićenja T_s, povećanja obujma pri isparivanju $v'' - v'$ i diferencijalnog kvocijenta $\mathrm{d}p/\mathrm{d}T$:

$$r = T_s\,(v'' - v') \cdot (\mathrm{d}p/\mathrm{d}T) \qquad r = h'' - h'.$$

Pregrijana para je realni plin koji je pregrijan iznad temperature zasićenja i ne sadrži više nikakve kapljevine.

Obično smatramo pregrijanom onu paru koja nije pregrijana mnogo iznad temperature zasićenja i nju moramo računati po posebnim zakonima za pregrijanu paru, dok se visokopregrijane pare postupno približuju svojstvima idealnih plinova.

Veličine stanja pregrijane pare (p, v, h, s) funkcije su tlaka i temperature:

$$p\,v = RT + f_1(p, T) \qquad h = h'' + \int c_p\,\mathrm{d}T \qquad s = s'' + \int c_p\,(\mathrm{d}T/T)$$

$$c_p = f_2(p, T).$$

Za pregrijanu paru sastavljene su razne tablice o parama, npr.:

– za zrak (ako uzimamo u obzir odstupanje od idealnih plinova) na str. 199.

– za pregrijanu vodenu paru na str. 205 .. 217.

Pregled šireg područja (zasićene i pregrijane) vodene pare posebno zorno predočuje Mollierov h, s dijagram (str. 200 i 201).

Zrak kao pregrijana para (koji pri točnijem računanju odstupa od zakona idealnih plinova).

Toplinska svojstva zraka pri tlaku p i temperaturi t

Temperatura t / °C	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija[1] h / kJ/(kg K)	Specifična entropija s / kJ/(kg K)	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija[1] h / kJ/(kg K)	Specifična entropija s / kJ/(kg K)
	p = 1 bar			p = 5 bar		
– 100	0,495 1	172,8	6,359	0,097 66	170,0	5,843
– 50	0,639 3	223,1	6,656	0,127 3	221,3	6,106
0	0,783 8	273,3	6,859	0,156 6	272,1	6,311
50	0,926 5	323,6	7,026	0,185 4	322,8	6,479
100	1,071	374,1	7,172	0,214 4	373,5	6,584
200	1,356	476,1	7,415	0,271,6	475,7	6,868
400	1,930	686,1	7,775	0,386 7	686,1	7,229
	p = 10 bar			p = 20 bar		
– 100	0,047 98	166,7	5,632	0,023 14	159,7	5,403
– 50	0,063 29	219,3	5,899	0,031 29	215,3	5,587
0	0,078 17	270,9	6,121	0,038 97	268,0	5,900
50	0,092 71	321,9	6,277	0,046 39	319,9	6,072
100	0,107 3	372,8	6,424	0,053 80	371,5	6,221
200	0,136 1	475,2	6,668	0,068 33	474,4	6,467
400	0,193 8	686,1	7,030	0,097 31	686,1	6,830
	p = 40 bar			p = 60 bar		
– 100	0,010 72	144,4	5,137	0,006 582	118,0	4,944
– 50	0,015 29	207,1	5,460	0,009 955	195,0	5,315
0	0,019 36	262,8	5,685	0,012 83	255,2	5,552
50	0,023 22	316,2	5,862	0,015 50	311,0	5,734
100	0,027 03	368,9	6,015	0,018 11	365,2	5,890
200	0,034 44	473,2	6,263	0,023 15	471,8	6,142
400	0,049 08	686,2	6,629	0,033 00	684,4	6,510
	p = 80 bar			p = 100 bar		
– 100	0,004 512	109,2	4,938	0,003 270	94,6	4,652
– 50	0,007 288	191,2	5,204	0,005 688	183,7	5,114
0	0,009 564	252,8	5,454	0,007 604	248,1	5,420
50	0,011 64	309,3	5,641	0,009 328	306,1	5,567
100	0,013 65	364,0	5,800	0,010 97	361,9	5,729
200	0,017 50	471,2	6,056	0,014 11	470,2	5,987
400	0,024 96	686,6	6,425	0,020 14	686,8	6,359

[1] Ishodište za specifičnu entalpiju h i specifičnu entropiju s izabrano je pri (idealiziranoj) apsolutnoj nuli.

Specifična entalpija h (kJ/kg)

4 600 · 4 400 · 4 200 · 4 000 · 3 800 · 3 600 · 3 400 · 3 200 · 3 000 · 2 800 · 2 600 · 2 400 · 2 200 · 2 000

5,5 · 6,0 · 6,5 · 7,0 · 7,5 · 8,0 · 8,5 · 9,0

Specifična entropija s kJ/(kg K)

Mollierov h, s dijagram za vodenu paru

$\vartheta = 0$ °C, $p = 0{,}006\,108$ bar

Toplinska svojstva vrele vode i suhozasićene vodene pare pri temperaturama od 0 do 374,15 °C

Temp.	Tlak	Specifični obujam		Specifična entalpija		Specifična entropija	
t_s / °C	p / bar	v' / m³/kg	v'' / m³/kg	h' / kJ/kg	h'' / kJ/kg	s' / kJ/(kg K)	s'' / kJ/(kg K)
0,04	0,006 112	0,001 000 2	206,2	0,00	2 502	0,000 0	9,158
5	0,008 718	0,001 000 0	147,2	21,01	2 511	0,076 2	9,027
10	0,012 27	0,001 000 3	106,4	41,99	2 520	0,151 0	8,902
15	0,017 04	0,001 001	77,98	62,94	2 529	0,224 3	8,783
20	0,023 37	0,001 002	57,84	83,86	2 538	0,296 3	8,668
25	0,031 66	0,001 003	43,40	104,8	2 547	0,367 0	8,559
30	0,042 41	0,001 004	32,93	125,7	2 556	0,436 5	8,455
35	0,056 22	0,001 006	25,24	146,6	2 565	0,504 9	8,354
40	0,073 75	0,001 008	19,55	167,5	2 574	0,572 1	8,258
45	0,095 82	0,001 010	15,28	188,4	2 583	0,638 3	8,166
50	0,123 4	0,001 012	12,05	209,3	2 592	0,703 5	8,078
55	0,157 4	0,001 015	9,579	230,2	2 601	0,767 7	7,993
60	0,199 2	0,001 017	7,679	251,1	2 610	0,831 0	7,911
65	0,250 1	0,001 020	6,202	272,0	2 618	0,893 3	7,832
70	0,311 6	0,001 023	5,046	293,0	2 627	0,954 8	7,757
75	0,385 5	0,001 026	4,134	313,9	2 635	1,015	7,684
80	0,473 6	0,001 029	3,409	334,9	2 644	1,075	7,613
85	0,578 0	0,001 033	2,829	355,9	2 652	1,134	7,545
90	0,701,1	0,001 036	2,361	376,9	2 660	1,193	7,480
95	0,845 3	0,001 040	1,982	398,0	2 668	1,250	7,417
100	1,013 3	0,001 044	1,673	419,1	2 676	1,307	7,355
105	1,208	0,001 048	1,419	440,2	2 684	1,363	7,296
110	1,433	0,001 052	1,210	461,3	2 691	1,419	7,239
115	1,691	0,001 056	1,036	482,5	2 699	1,473	7,183
120	1,985	0,001 061	0,891 5	503,7	2 706	1,528	7,129
125	2,321	0,001 065	0,770 2	525,0	2 713	1,581	7,077
130	2,701	0,001 070	0,668 1	546,3	2 720	1,634	7,026
135	3,131	0,001 075	0,581 8	567,7	2 727	1,687	6,977
140	3,614	0,001 080	0,508 5	589,1	2 733	1,739	6,928
145	4,155	0,001 085	0,446 0	610,6	2 739	1,791	6,882
150	4,760	0,001 091	0,392 4	632,2	2 745	1,842	6,836
155	5,433	0,001 096	0,346 4	653,8	2 751	1,892	6,791
160	6,181	0,001 102	0,306 8	675,5	2 757	1,943	6,748
165	7,008	0,001 108	0,272 4	697,3	2 762	1,992	6,705
170	7,920	0,001 115	0,242 6	719,1	2 767	2,042	6,663
175	8,924	0,001 121	0,216 5	741,1	2 772	2,091	6,622
180	10,03	0,001 128	0,193 8	763,1	2 776	2,139	6,582
185	11,23	0,001 134	0,173 9	785,3	2 780	2,188	6,542

Toplinska svojstva vrele vode i suhozasićene vodene pare pri temperaturama od 0 do 374,15 °C (*konac*)

Temp.	Tlak	Specifični obujam		Specifična entalpija		Specifična entropija	
t_s / °C	p / bar	v' / m³/kg	v'' / m³/kg	h' / kJ/kg	h'' / kJ/kg	s' / kJ/(kg K)	s'' / kJ/(kg K)
190	12,55	0,001 142	0,156 3	807,5	2 784	2,336	6,504
195	13,99	0,001 149	0,140 8	829,9	2 788	2,283	6,465
200	15,55	0,001 157	0,127 2	852,4	2 791	2,331	6,428
205	17,24	0,001 164	0,115 0	875,0	2 794	2,378	6,391
210	19,08	0,001 173	0,104 2	897,7	2 796	2,425	6,354
215	21,06	0,001 181	0,094 63	920,6	2 798	2,471	6,318
220	23,20	0,001 190	0,086 04	943,7	2 800	2,518	6,282
225	25,50	0,001 199	0,078 35	966,9	2 801	2,564	6,246
230	27,98	0,001 209	0,071 45	990,3	2 802	2,610	6,211
235	30,63	0,001 219	0,065 25	1 014	2 802	2,656	6,176
240	33,48	0,001 229	0,059 65	1 038	2 802	2,702	6,141
245	36,52	0,001 240	0,054 61	1 062	2 802	2,748	6,106
250	39,78	0,001 251	0,050 04	1 086	2 800	2,794	6,071
255	43,25	0,001 263	0,045 90	1 110	2 799	2,839	6,036
260	46,94	0,001 276	0,042 13	1 135	2 796	2,885	6,001
265	50,88	0,001 289	0,038 71	1 160	2 794	2,931	5,966
270	55,06	0,001 303	0,035 59	1 185	2 70	2,976	5,930
275	59,50	0,001 317	0,032 74	1 211	2 786	3,022	5,895
280	64,20	0,001 332	0,030 13	1 237	2 780	3,068	5,859
285	69,19	0,001 349	0,027 73	1 263	2 774	3,115	5,822
290	74,46	0,001 366	0,025 54	1 290	2 768	3,161	5,785
295	80,04	0,001 384	0,023 51	1 317	2 760	3,208	5,747
300	85,93	0,001 404	0,021 65	1 345	2 751	3,255	5,708
305	92,14	0,001 425	0,019 93	1 373	2 741	3,303	5,669
310	98,70	0,001 448	0,018 33	1 402	2 730	3,351	5,628
315	105,6	0,001 473	0,016 86	1 432	2 718	3,400	5,586
320	112,9	0,001 500	0,015 48	1 463	2 704	3,450	5,542
325	120,6	0,001 529	0,014 19	1 494	2 688	3,501	5,497
330	128,6	0,001 562	0,012 99	1 527	2 670	3,553	5,449
335	137,1	0,001 598	0,011 85	1 560	2 650	3,606	5,398
340	146,1	0,001 639	0,010 78	1 596	2 626	3,662	5,343
345	155,5	0,001 686	0,009 763	1 633	2 599	3,719	5,283
350	165,4	0,001 741	0,008 799	1 672	2 568	3,780	5,218
355	175,8	0,001 809	0,007 859	1 717	2 530	3,849	5,144
360	186,8	0,001 896	0,006 940	1 764	2 485	3,921	5,060
365	198,3	0,002 016	0,006 012	1 818	2 428	4002	4,958
370	210,5	0,002 214	0,004 973	1 890	2 343	4,111	4,814
374,15	221,20	0,003 17		2 107,4		4,442 9	

Toplinska svojstva vrele vode i suhozasićene vodene pare pri tlaku od 0,01 do 200 bar

Tlak	Temp.	Specifični obujam		Specifična entalpija		Specifična entropija	
$\frac{p}{\text{bar}}$	$\frac{t_s}{°\text{C}}$	$\frac{v'}{\text{m}^3/\text{kg}}$	$\frac{v''}{\text{m}^3/\text{kg}}$	$\frac{h'}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{h''}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{s'}{\text{kJ/(kg K)}}$	$\frac{s''}{\text{kJ/(kg K)}}$
0,01	6,983	0,001 000	129,2	29,34	2 514	0,106 0	8,977
0,02	17,51	0,001 001	67,01	73,46	2 534	0,260 7	8,725
0,04	28,98	0,001 004	34,80	121,4	2 555	0,422 5	8,476
0,06	36,18	0,001 006	23,74	151,5	2 568	0,520 9	8,331
0,08	41,53	0,001 008	18,10	173,9	2 577	0,592 5	8,230
0,1	45,83	0,001 010	14,67	191,8	2 585	0,649 3	8,151
0,12	49,45	0,001 012	12,36	206,9	2 591	0,696 3	8,087
0,16	55,34	0,001 015	9,433	231,6	2 602	0,772 1	7,987
0,2	60,09	0,001 017	7,650	251,5	2 610	0,832 1	7,909
0,25	64,99	0,001 020	6,204	272,0	2 618	0,893 2	7,832
0,3	69,12	0,001 022	5,229	289,3	2 625	0,944 1	7,770
0,4	75,89	0,001 027	3,993	317,7	2 637	1,026	7,671
0,5	81,35	0,001 030	3,240	340,6	2 646	1,091	7,595
0,6	85,95	0,001 033	2,732	359,9	2 654	1,145	7,533
0,8	93,51	0,001 039	2,087	391,7	2 666	1,233	7,435
1,0	99,63	0,001 043	1,694	417,5	2 675	1,303	7,360
1,2	104,8	0,001 048	1,428	439,4	2 683	1,361	7,298
1,6	113,3	0,001 055	1,091	475,4	2 696	1,455	7,202
2,0	120,2	0,001 061	0,885 4	504,7	2 706	1,530	7,127
2,5	127,4	0,001 068	0,718 4	535,3	2 716	1,607	7,052
3	133,5	0,001 074	0,605 6	561,4	2 725	1,672	6,991
4	143,6	0,001 084	0,462 2	604,7	2 738	1,776	6,894
5	151,8	0,001 093	0,374 7	640,1	2 748	1,860	6,819
6	158,8	0,001 101	0,315 5	670,4	2 756	1,931	6,758
8	170,4	0,001 115	0,240 3	720,9	2 768	2,046	6,660
10	179,9	0,001 127	0,194 3	762,6	2 776	2,138	6,583
12	188,0	0,001 139	0,163 2	798,4	2 783	2,216	6,519
16	201,4	0,001 159	0,123 7	858,6	2 792	2,344	6,418
20	212,4	0,001 177	0,099 54	908,6	2 797	2,447	6,337
25	223,9	0,001 197	0,079 91	962,0	2 801	2,554	6,254
30	233,8	0,001 216	0,066 63	1 008	2 802	2,646	6,184
40	250,3	0,001 252	0,049 75	1 087	2 800	2,797	6,069
50	263,9	0,001 286	0,039 43	1 155	2 794	2,921	5,974
60	275,6	0,001 319	0,032 44	1 214	2 785	3,027	5,891
80	295,0	0,001 384	0,023 53	1 317	2 760	3,208	5,747
100	311,0	0,001 453	0,018 04	1 408	2 728	3,361	5,620
120	324,7	0,001 527	0,014 28	1 492	2 689	3,497	5,500
160	347,3	0,001 710	0,009 308	1 651	2 585	3,747	5,253
200	365,7	0,002 037	0,005 877	1 827	2 418	4,015	4,941

Toplinska svojstva pothlađene vode i pregrijane vodene pare pri temperaturi t i tlaku p

Temperatura	Specifični obujam	Specifična entalpija	Specifična entropija	Specifični obujam	Specifična entalpija	Specifična entropija
$\frac{t}{°\text{C}}$	$\frac{v}{\text{m}^3/\text{kg}}$	$\frac{h}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{s}{\text{kJ/(kg K)}}$	$\frac{v}{\text{m}^3/\text{kg}}$	$\frac{h}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{s}{\text{kJ/(kg K)}}$
	p = 0,01 bar			p = 0,02 bar		
0	0,001 000 2	–0,0	–0,000 2	0,001 000 2	–0,0	–0,000 2
20	135,2	2 539	9,061	67,58	2 538	8,740
40	144,5	2 576	9,184	72,21	2 576	8,864
60	153,7	2 613	9,300	76,84	2 613	8,980
80	163,0	2 651	9,410	81,46	2 651	9,089
100	172,2	2 689	9,514	86,08	2 689	9,193
	p = 0,04 bar			p = 0,06 bar		
0	0,001 000 2	–0,0	–0,000 2	0,001 000 2	–0,0	–0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	36,08	2 575	8,543	24,04	2 575	8,354
60	38,40	2 613	8,659	25,59	2 612	8,471
80	40,71	2 650	8,769	27,13	2 650	8,581
100	43,03	2 688	8,873	28,68	2 688	8,685
120	45,34	2 726	8,972	30,22	2 726	8,785
	p = 0,08 bar			p = 0,10 bar		
0	0,001 000 2	–0,0	–0,000 2	0,001 000 2	–0,0	–0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	19,18	2 612	8,337	15,34	2 612	8,233
80	20,34	2 650	8,448	16,27	2 650	8,344
100	21,50	2 688	8,552	17,20	2 688	8,449
120	22,66	2 726	8,652	18,12	2 726	8,548
	p = 0,12 bar			p = 0,16 bar		
0	0,001 000 2	–0,0	–0,000 2	0,001 000 2	–0,0	–0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 000 2	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	12,77	2 611	8,148	9,570	2 611	8,014
80	13,55	2 649	8,259	10,16	2 649	8,125
100	14,33	2 687	8,364	10,74	2 687	8,230
120	15,10	2 725	8,464	11,32	2 725	8,330
140	15,87	2 764	8,559	11,90	2 763	8,425

Toplinska svojstva pothlađene vode i pregrijane vodene pare pri temperaturi t i tlaku p (*nastavak*)

Temperatura t / °C	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)
	p = 0,2 bar			p = 0,25 bar		
0	0,001 000 2	−0,0	−0,000 2	0,001 000 2	−0,0	−0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	0,001 017	251,1	0,831 0	0,001 017	251,1	0,831 0
80	8,117	2 648	8,021	6,488	2 647	7,916
100	8,585	2 686	8,126	6,864	2 686	8,022
120	9,051	2 725	8,226	7,237	2 724	8,123
140	9,516	2 763	8,322	7,611	2 763	8,219
160	9,980	2 802	8,413	7,982	2 801	8,310
	p = 0,3 bar			p = 0,4 bar		
0	0,001 000 2	−0,0	−0,000 2	0,001 000 2	0,0	−0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	0,001 017	251,1	0,831 0	0,001 017	251,1	0,831 0
80	5,401	2 647	7,830	4,042	2 645	7,694
100	5,714	2 685	7,936	4,279	2 684	7,801
120	6,027	2 724	8,037	4,515	2 723	7,902
140	6,338	2 762	8,133	4,749	2 761	7,999
160	6,648	2 801	8,224	4,983	2 800	8,090
180	6,958	2 840	8,312	5,215	2 839	8,178
	p = 0,5 bar			p = 0,6 bar		
0	0,001 000 2	0,0	−0,000 2	0,001 000 2	0,0	−0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	0,001 017	251,1	0,831 0	0,001 017	251,1	0,831 0
80	0,001 029	334,9	1,075	0,001 029	334,9	1,075
100	3,418	2 683	7,695	2,844	2 681	7,609
120	3,607	2 722	7,797	3,002	2 721	7,711
140	3,796	2 761	7,894	3,160	2 760	7,808
160	3,983	2 800	7,986	3,317	2 799	7,901
180	4,170	2 839	8,074	3,473	2 838	7,989
200	4,356	2 878	8,159	3,628	2 877	8,074

Toplinska svojsva pothlađene vode i pregrijane vodene pare pri temperaturi t i tlaku p (*nastavak*)

Temperatura t / °C	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)
	p = 0,8 bar			p = 1,0 bar		
0	0,001 000 2	0,0	−0,000 1	0,001 000 2	0,1	−0,000 1
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	84,0	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	0,001 017	251,1	0,831 0	0,001 017	251,2	0,830 9
80	0,001 029	334,9	1,075	0,001 029	335,0	1,075
100	2,126	2 679	7,470	1,696	2 676	7,362
120	2,246	2 719	7,574	1,793	2 717	7,467
140	2,365	2 758	7,672	1,889	2 756	7,566
160	2,484	2 798	7,766	1,984	2 796	7,660
180	2,601	2 837	7,854	2,078	2 836	7,750
200	2,718	2 876	7,940	2,172	2 875	7,835
220	2,835	2 906	8,021	2,266	2 915	7,917
240	2,952	2 955	8,100	2,359	2 955	7,996
260	3,068	2 995	8,176	2,453	2 994	8,072
280	3,184	3 035	8,249	2,546	3 034	8,145
300	3,300	3 075	8,320	2,639	3 075	8,217
	p = 1,2 bar			p = 1,6 bar		
0	0,001 000 2	0,1	−0,000 1	0,001 000 2	0,1	−0,000 1
20	0,001 002	84,0	0,296 3	0,001 002	84,0	0,296 3
40	0,001 008	167,6	0,572 1	0,001 008	167,6	0,572 1
60	0,001 017	251,2	0,830 9	0,001 017	251,2	0,830 9
80	0,001 029	335,0	1,075	0,001 029	335,0	1,075
100	0,001 044	419,1	1,307	0,001 044	419,1	1,307
120	1,490	2 714	7,379	1,112	2 710	7,237
140	1,571	2 755	7,479	1,173	2 751	7,340
160	1,651	2 795	7,573	1,234	2 792	7,436
180	1,730	2 835	7,663	1,294	2 832	7,527
200	1,808	2 874	7,749	1,353	2 873	7,613
220	1,887	2 914	7,832	1,413	2 913	7,696
240	1,965	2 954	7,911	1,471	2 953	7,776
260	2,043	2 994	7,987	1,530	2 993	7,852
280	2,120	3 034	8,061	1,588	3 033	7,926
300	2,198	3 074	8,132	1,647	3 073	7,998

Toplinska svojsva pothlađene vode i pregrijane vodene pare pri temperaturi t i tlaku p (nastavak)

Temperatura t °C	Specifični obujam v m³/kg	Specifična entalpija h kJ/kg	Specifična entropija s kJ/(kg K)	Specifični obujam v m³/kg	Specifična entalpija h kJ/kg	Specifična entropija s kJ/(kg K)
	p = 2,0 bar			p = 0,25 bar		
0	0,001 000 1	0,2	−0,000 1	0,001 000 1	0,2	−0,000 1
20	0,001 002	84,0	0,296 3	0,001 002	84,1	0,296 2
40	0,001 008	167,6	0,572 0	0,001 008	167,7	0,572 0
60	0,001 017	251,2	0,830 9	0,001 017	251,3	0,830 9
80	0,001 029	335,0	1,075	0,001 029	335,1	1,075
100	0,001 044	419,1	1,307	0,001 044	419,2	1,307
120	0,001 061	503,7	1,528	0,001 061	503,8	1,528
140	0,934 9	2 748	7,230	0,744 0	2 743	7,118
160	0,984 0	2 789	7,328	0,784 0	2 786	7,218
180	1,033	2 830	7,420	0,823 2	2 827	7,312
200	1,080	2 871	7,507	0,862 0	2 868	7,400
220	1,128	2 911	7,591	0,900 4	2 909	7,485
240	1,175	2 951	7,671	0,938 5	2 949	7,565
260	1,222	2 991	7,748	0,976 3	2 990	7,643
280	1,269	3 032	7,822	1,014	3 030	7,717
300	1,316	3 072	7,894	1,052	3 071	7,789
	p = 3 bar			p = 4 bar		
0	0,001 000 1	0,3	−0,000 1	0,001 000	0,4	−0,000 1
20	0,001 002	84,1	0,296 2	0,001 002	84,2	0,296 2
40	0,001 008	167,7	0,572 0	0,001 008	167,8	0,572 0
60	0,001 017	251,3	0,830 8	0,001 017	251,4	0,830 8
80	0,001 029	335,1	1,075	0,001 029	335,2	1,075
100	0,001 044	419,2	1,307	0,001 044	419,3	1,307
120	0,001 061	503,8	1,528	0,001 061	503,9	1,527
140	0,616 7	2 739	7,025	0,001 080	589,1	1,739
160	0,650 6	2 782	7,127	0,483 7	2 774	6,981
180	0,683 7	2 824	7,222	0,509 3	2 818	7,079
200	0,716 4	2 866	7,312	0,534 3	2 860	7,171
220	0,748 6	2 907	7,397	0,558 9	2 902	7,258
240	0,780 5	2 948	7,478	0,583 1	2 944	7,340
260	0,812 3	2 988	7,556	0,607 2	2 985	7,419
280	0,843 8	3 029	7,631	0,631 1	3 026	7,495
300	0,875 3	3 070	7,703	0,654 9	3 067	7,568

Toplinska svojsva pothlađene vode i pregrijane vodene pare pri temperaturi t i tlaku p (nastavak)

Temperatura t °C	Specifični obujam v m³/kg	Specifična entalpija h kJ/kg	Specifična entropija s kJ/(kg K)	Specifični obujam v m³/kg	Specifična entalpija h kJ/kg	Specifična entropija s kJ/(kg K)
	p = 5 bar			p = 6 bar		
0	0,001 000	0,5	−0,000 1	0,001 000	0,6	−0,000 1
20	0,001 002	84,3	0,296 2	0,001 002	84,4	0,296 2
40	0,001 008	167,9	0,571 9	0,001 008	168,0	0,571 9
60	0,001 017	251,5	0,830 7	0,001 017	251,6	0,830 7
80	0,001 029	335,3	1,075	0,001 029	335,4	1,075
100	0,001 044	419,4	1,307	0,001 043	419,4	1,307
120	0,001 061	503,9	1,527	0,001 060	504,0	1,527
140	0,001 080	589,2	1,739	0,001 080	589,3	1,739
160	0,383 5	2 766	6,863	0,316 5	2 758	6,764
180	0,404 5	2 811	6,965	0,334 6	2 805	6,869
200	0,425 0	2 855	7,059	0,352 0	2 850	6,966
220	0,445 0	2 898	7,148	0,369 0	2 894	7,057
240	0,464 7	2 940	7,232	0,385 7	2 936	7,142
260	0,484 1	2 982	7,312	0,402 1	2 979	7,223
280	0,503 4	3 023	7,388	0,418 3	3 021	7,300
300	0,522 6	3 065	7,461	0,434 4	3 062	7,374
320	0,541 6	3 106	7,532	0,450 4	3 104	7,445
340	0,560 6	3 147	7,601	0,466 3	3 145	7,514
360	0,579 5	3 189	7,667	0,482 1	3 187	7,581
380	0,598 4	3 230	7,732	0,497 9	3 229	7,646
400	0,617 2	3 272	7,795	0,513 6	3 271	7,709
420	0,635 9	3 314	7,856	0,529 3	3 313	7,771
440	0,654 7	3 356	7,916	0,545 0	3 355	7,831
460	0,673 4	3 398	7,975	0,560 6	3 397	7,889
480	0,692 1	3 441	8,032	0,576 2	3 440	7,947
500	0,710 8	3 484	8,088	0,591 8	3 483	8,003
520	0,729 4	3 527	8,143	0,607 4	3 526	8,058
540	0,748 1	3 570	8,197	0,623 0	3 569	8,112
560	0,766 7	3 614	8,250	0,638 6	3 613	8,165
580	0,785 3	3 657	8,302	0,654 1	3 657	8,217
600	0,803 9	3 702	8,353	0,669 6	3 701	8,268
620	0,822 5	3 746	8,403	0,685 1	3 745	8,318
640	0,841 1	3 790	8,452	0,700 7	3 790	8,367

Toplinska svojsva pothlađene vode i pregrijane vodene pare pri temperaturi t i tlaku p *(nastavak)*

Temperatura t / °C	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)
	p = 8 bar			p = 10 bar		
0	0,001 000	0,8	−0,000 1	0,001 000	1,0	−0,000 1
20	0,001 001	84,6	0,296 1	0,001 001	84,8	0,296 1
40	0,001 008	168,2	0,571 8	0,001 007	168,3	0,571 7
60	0,001 017	251,7	0,830 6	0,001 017	251,9	0,830 5
80	0,001 029	335,5	1,075	0,001 029	335,7	1,075
100	0,001 043	419,6	1,306	0,001 043	419,7	1,306
120	0,001 060	504,1	1,527	0,001 060	504,3	1,527
140	0,001 080	589,4	1,739	0,001 080	589,5	1,738
160	0,001 102	675,6	1,942	0,001 102	675,7	1,942
180	0,247 1	2 791	6,712	0,194 4	2 777	6,584
200	0,260 8	2 839	6,815	0,205 9	2 827	6,692
220	0,274 0	2 884	6,909	0,216 9	2 875	6,791
240	0,286 9	2 929	6,998	0,227 6	2 921	6,883
260	0,299 5	2 972	7,081	0,237 9	2 965	6,968
280	0,311 9	3 015	7,160	0,248 0	3 009	7,049
300	0,324 1	3 057	7,235	0,258 0	3 052	7,125
320	0,336 3	3 099	7,307	0,267 8	3 095	7,198
340	0,348 3	3 141	7,377	0,277 6	3 137	7,269
360	0,360 3	3 183	7,444	0,287 3	3 180	7,337
380	0,372 3	3 225	7,509	0,296 9	3 222	7,403
400	0,384 2	3 268	7,573	0,306 5	3 264	7,467
420	0,396 0	3 310	7,635	0,316 0	3 307	7,529
440	0,407 8	3 352	7,695	0,325 6	3 350	7,589
460	0,419 6	3 395	7,754	0,335 0	3 392	7,648
480	0,431 4	3 438	7,812	0,344 5	3 435	7,706
500	0,443 2	3 481	7,868	0,354 0	3 478	7,763
520	0,454 9	3 524	7,923	0,363 4	3 522	7,818
540	0,466 6	3 567	7,977	0,372 8	3 565	7,872
560	0,478 3	3 611	8,030	0,382 2	3 609	7,926
580	0,490 0	3 655	8,082	0,391 6	3 653	7,978
600	0,501 7	3 699	8,134	0,401 0	3 697	8,029
620	0,513 4	3 744	8,184	0,410 4	3 742	8,080
640	0,525 1	3 788	8,233	0,419 7	3 787	8,129

Toplinska svojsva pothlađene vode i pregrijane vodene pare pri temperaturi t i tlaku p *(nastavak)*

Temperatura t / °C	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)
	p = 12 bar			p = 16 bar		
0	0,001 000	1,2	−0,000 1	0,000 999 4	1,6	−0,000 0
20	0,001 001	85,0	0,296 1	0,001 001	85,4	0,296 0
40	0,001 007	168,5	0,571 7	0,001 007	168,9	0,571 5
60	0,001 017	252,1	0,830 4	0,001 016	252,4	0,830 1
80	0,001 029	335,8	1,075	0,001 028	336,1	1,074
100	0,001 043	419,9	1,306	0,001 043	420,2	1,306
120	0,001 060	504,4	1,527	0,001 060	504,7	1,526
140	0,001 080	589,6	1,738	0,001 079	589,9	1,738
160	0,001 102	675,8	1,942	0,001 102	676,0	1,941
180	0,001 127	763,2	2,139	0,001 127	763,4	2,139
200	0,169 2	2 814	6,587	0,001 156	852,4	2,331
220	0,178 8	2 865	6,691	0,131 0	2 843	6,524
240	0,187 9	2 912	6,786	0,138 3	2 895	6,626
260	0,196 8	2 958	6,874	0,145 3	2 944	6,720
280	0,205 4	3 003	6,956	0,152 1	2 991	6,806
300	0,213 9	3 047	7,034	0,158 7	3 036	6,887
320	0,222 2	3 090	7,109	0,165 1	3 081	6,964
340	0,230 4	3 133	7,180	0,171 4	3 125	7,037
360	0,238 6	3 176	7,248	0,177 7	3 169	7,107
380	0,246 7	3 219	7,315	0,183 8	3 212	7,174
400	0,254 7	3 261	7,379	0,190 0	3 255	7,239
420	0,262 7	3 304	7,442	0,196 1	3 298	7,303
440	0,270 7	3 347	7,502	0,202 1	3 341	7,364
460	0,278 7	3 390	7,562	0,208 2	3 385	7,424
480	0,286 6	3 433	7,620	0,214 2	3 428	7,482
500	0,294 5	3 476	7,677	0,220 2	3 472	7,540
520	0,302 4	3 520	7,732	0,226 1	3 515	7,595
540	0,310 3	3 563	7,786	0,232 1	3 559	7,650
560	0,318 1	3 607	7,840	0,238 0	3 604	7,704
580	0,326 0	3 651	7,892	0,244 0	3 648	7,756
600	0,333 8	3 696	7,944	0,249 9	3 693	7,808
620	0,341 7	3 740	7,994	0,255 8	3 737	7,859
640	0,349 5	3 785	8,044	0,261 7	3 782	7,909

Toplinska svojstva pothlađene vode i pregrijane vodene pare pri temperaturi t i tlaku p (*nastavak*)

Temperatura $\frac{t}{°C}$	Specifični obujam $\frac{v}{m^3/kg}$	Specifična entalpija $\frac{h}{kJ/kg}$	Specifična entropija $\frac{s}{kJ/(kg\ K)}$	Specifični obujam $\frac{v}{m^3/kg}$	Specifična entalpija $\frac{h}{kJ/kg}$	Specifična entropija $\frac{s}{kJ/(kg\ K)}$
	p = 20 bar			p = 25 bar		
0	0,000 999 2	2,0	–0,000 0	0,000 999 0	2,5	0,000 0
20	0,001 001	85,7	0,295 9	0,001 001	86,2	0,295 8
40	0,001 007	169,2	0,571 3	0,001 007	169,7	0,571 1
60	0,001 016	252,7	0,829 9	0,001 016	253,2	0,829 7
80	0,001 028	336,5	1,074	0,001 028	336,9	1,074
100	0,001 043	420,5	1,305	0,001 043	420,9	1,305
120	0,001 060	505,0	1,526	0,001 059	505,3	1,526
140	0,001 079	590,2	1,737	0,001 079	590,5	1,737
160	0,001 101	676,3	1,941	0,001 101	676,6	1,940
180	0,001 127	763,6	2,138	0,001 126	763,9	2,137
200	0,001 156	852,6	2,330	0,001 156	852,8	2,329
220	0,102 1	2 820	6,383	0,001 190	943,7	2,518
240	0,108 4	2 876	6,494	0,084 36	2 851	6,352
260	0,114 4	2 928	6,594	0,089 51	2 907	6,461
280	0,120 0	2 978	6,685	0,094 33	2 960	6,558
300	0,125 5	3 025	6,770	0,098 93	3 010	6,647
320	0,130 8	3 071	6,849	0,103 4	3 059	6,730
340	0,136 0	3 116	6,924	0,107 6	3 105	6,807
360	0,141 1	3 161	6,995	0,111 8	3 151	6,880
380	0,146 1	3 205	7,064	0,116 0	3 196	6,951
400	0,151 1	3 249	7,130	0,120 0	3 241	7,018
420	0,156 1	3 292	7,194	0,124 1	3 285	7,083
440	0,161 0	3 336	7,256	0,128 1	3 329	7,146
460	0,165 9	3 380	7,316	0,132 0	3 373	7,207
480	0,170 7	3 423	7,375	0,136 0	3 418	7,266
500	0,175 6	3 467	7,432	0,139 9	3 462	7,324
520	0,180 4	3 511	7,489	0,143 8	3 506	7,381
540	0,185 2	3 556	7,544	0,147 7	3 551	7,436
560	0,190 0	3 600	7,597	0,151 5	3 595	7,490
580	0,194 7	3 644	7,650	0,155 4	3 640	7,543
600	0,199 5	3 689	7,702	0,159 2	3 685	7,596
620	0,204 3	3 734	7,753	0,163 0	3 730	7,647
640	0,209 0	3 779	7,803	0,166 9	3 776	7,697

Toplinska svojstva pothlađene vode i pregrijane vodene pare pri temperaturi t i tlaku p (*nastavak*)

Temperatura $\frac{t}{°C}$	Specifični obujam $\frac{v}{m^3/kg}$	Specifična entalpija $\frac{h}{kJ/kg}$	Specifična entropija $\frac{s}{kJ/(kg\ K)}$	Specifični obujam $\frac{v}{m^3/kg}$	Specifična entalpija $\frac{h}{kJ/kg}$	Specifična entropija $\frac{s}{kJ/(kg\ K)}$
	p = 30 bar			p = 40 bar		
0	0,000 998 7	3,0	0,000 1	0,000 998 2	4,0	0,000 2
20	0,001 000	86,7	0,295 7	0,000 999 9	87,6	0,295 5
40	0,001 007	170,1	0,571 0	0,001 006	171,0	0,570 6
60	0,001 016	253,6	0,829 4	0,001 015	254,4	0,828 9
80	0,001 028	337,3	1,073	0,001 027	338,1	1,073
100	0,001 042	421,2	1,305	0,001 042	422,0	1,304
120	0,001 059	505,7	1,525	0,001 058	506,4	1,524
140	0,001 078	590,8	1,736	0,001 078	591,5	1,735
160	0,001 101	676,9	1,940	0,001 100	677,5	1,939
180	0,001 126	764,1	2,137	0,001 125	764,6	2,135
200	0,001 155	853,0	2,328	0,001 154	853,4	2,327
220	0,001 189	943,9	2,517	0,001 188	944,1	2,515
240	0,068 16	2 823	6,224	0,001 228	1 038	2,701
260	0,072 83	2 885	6,343	0,051 72	2 836	6,135
280	0,077 12	2 942	6,448	0,055 44	2 902	6,258
300	0,081 16	2 995	6,542	0,058 83	2 962	6,364
320	0,085 00	3 045	6,629	0,062 00	3 018	6,459
340	0,088 71	3 094	6,709	0,064 99	3 070	6,546
360	0,092 32	3 141	6,784	0,067 87	3 120	6,627
380	0,095 84	3 187	6,856	0,070 66	3 168	6,702
400	0,099 31	3 233	6,925	0,073 38	3 216	6,773
420	0,102 7	3 278	6,991	0,076 04	3 262	6,841
440	0,106 1	3 322	7,054	0,078 66	3 308	6,907
460	0,109 5	3 367	7,116	0,081 25	3 354	6,970
480	0,112 8	3 142	7,176	0,083 81	3 400	7,031
500	0,116 1	3 456	7,235	0,086 34	3 445	7,091
520	0,119 4	3 501	7,292	0,088 86	3 490	7,149
540	0,122 6	3 546	7,347	0,091 35	3 536	7,206
560	0,125 9	3 591	7,402	0,093 84	3 581	7,261
580	0,129 1	3 636	7,455	0,096 31	3 627	7,315
600	0,132 3	3 681	7,508	0,098 76	3 673	7,368
620	0,135 6	3 727	7,559	0,101 2	3 719	7,420
640	0,138 8	3 772	7,610	0,103 6	3 765	7,471

Toplinska svojstva pothlađene vode i pregrijane vodene pare pri temperaturi t i tlaku p *(nastavak)*

Temperatura t / °C	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)
	p = 50 bar			p = 60 bar		
0	0,000 997 7	5,1	0,000 2	0,000 997 2	6,1	0,000 3
20	0,000 999 5	88,6	0,295 2	0,000 999 0	89,5	0,295 0
40	0,001 006	171,9	0,570 2	0,001 005	172,7	0,569 8
60	0,001 015	255,3	0,828 3	0,001 014	256,1	0,827 8
80	0,001 027	338,8	1,072	0,001 026	339,6	1,071
100	0,001 041	422,7	1,303	0,001 041	423,5	1,302
120	0,001 058	507,1	1,523	0,001 057	507,8	1,522
140	0,001 077	592,1	1,734	0,001 076	592,8	1,733
160	0,001 099	678,1	1,937	0,001 098	678,6	1,936
180	0,001 124	765,2	2,134	0,001 123	765,7	2,133
200	0,001 153	853,8	2,325	0,001 152	854,2	2,324
220	0,001 187	944,4	2,513	0,001 185	944,7	2,511
240	0,001 226	1 038	2,698	0,001 225	1 038	2,696
260	0,001 275	1 135	2,884	0,001 273	1 135	2,881
280	0,042 22	2 857	6,089	0,033 17	2 805	5,927
300	0,045 30	2 926	6,211	0,036 14	2 885	6,069
320	0,048 10	2 987	6,316	0,038 74	2 954	6,188
340	0,050 70	3 044	6,411	0,041 11	3 017	6,291
360	0,053 16	3 098	6,497	0,043 30	3 074	6,384
380	0,055 51	3 149	6,576	0,045 39	3 128	6,468
400	0,057 79	3 198	6,651	0,047 38	3 180	6,546
420	0,060 01	3 247	6,722	0,049 31	3 230	6,620
440	0,062 18	3 294	6,789	0,051 18	3 279	6,689
460	0,064 31	3 341	6,854	0,053 02	3 327	6,756
480	0,066 42	3 387	6,916	0,054 82	3 375	6,820
500	0,068 49	3 434	6,977	0,056 59	3 422	6,882
520	0,070 55	3 480	7,036	0,058 34	3 469	6,942
540	0,072 59	3 526	7,093	0,060 08	3 516	7,000
560	0,074 61	3 572	7,149	0,061 79	3 563	7,057
580	0,076 62	3 618	7,204	0,063 49	3 609	7,112
600	0,078 62	3 665	7,258	0,065 18	3 656	7,166
620	0,080 60	3 711	7,310	0,066 86	3 703	7,220
640	0,082 58	3 757	7,362	0,068 53	3 750	7,272

Toplinska svojstva pothlađene vode i pregrijane vodene pare pri temperaturi t i tlaku p *(nastavak)*

Temperatura t / °C	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)
	p = 80 bar			p = 100 bar		
0	0,000 996 2	8,1	0,000 4	0,000 995 3	10,1	0,000 5
20	0,000 998 1	91,4	0,294 6	0,000 997 2	93,2	0,294 2
40	0,001 004	174,5	0,569 0	0,001 003	176,3	0,568 2
60	0,001 014	257,8	0,826 7	0,001 013	259,4	0,825 7
80	0,001 025	341,2	1,070	0,001 025	342,8	1,069
100	0,001 040	425,0	1,301	0,001 039	426,5	1,299
120	0,001 056	509,2	1,521	0,001 055	510,6	1,519
140	0,001 075	594,1	1,731	0,001 074	595,4	1,729
160	0,001 097	679,8	1,934	0,001 095	681,0	1,932
180	0,001 122	766,7	2,130	0,001 120	767,8	2,127
200	0,001 150	855,1	2,321	0,001 148	855,9	2,318
220	0,001 183	945,3	2,508	0,001 181	945,9	2,504
240	0,001 222	1 038	2,692	0,001 219	1 038	2,688
260	0,001 269	1 135	2,876	0,001 265	1 134	2,871
280	0,001 328	1 236	3,063	0,001 322	1 235	3,056
300	0,024 26	2 787	5,794	0,001 398	1 343	3,249
320	0,026 81	2 879	5,952	0,019 26	2 784	5,715
340	0,028 96	2 955	6,079	0,021 47	2 883	5,880
360	0,030 88	3 023	6,187	0,023 31	2 965	6,011
380	0,032 65	3 084	6,283	0,024 93	3 036	6,121
400	0,034 31	3 142	6,369	0,026 41	3 100	6,218
420	0,035 89	3 196	6,449	0,027 79	3 160	6,306
440	0,037 40	3 249	6,524	0,029 11	3 216	6,386
460	0,038 87	3 300	6,595	0,030 36	3 271	6,461
480	0,040 30	3 350	6,662	0,031 58	3 323	6,532
500	0,041 70	3 399	6,726	0,032 76	3 375	6,599
520	0,043 08	3 447	6,788	0,033 91	3 425	6,664
540	0,044 43	3 496	6,848	0,035 04	3 475	6,726
560	0,045 77	3 544	6,907	0,036 15	3 525	6,786
580	0,047 09	3 592	6,964	0,037 24	3 574	6,845
600	0,048 39	3 640	7,019	0,038 32	3 623	6,901
620	0,049 69	3 687	7,073	0,039 39	3 672	6,957
640	0,050 97	3 735	7,126	0,040 44	3 720	7,011

Toplinska svojstva pothlađene vode i pregrijane vodene pare pri temperaturi t i tlaku p *(nastavak)*

Temperatura t / °C	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)
	p = 120 bar			p = 160 bar		
0	0,000 994 3	12,1	0,000 6	0,000 992 3	16,1	0,000 8
20	0,000 996 3	95,1	0,293 7	0,000 994 6	98,8	0,292 8
40	0,001 003	178,0	0,567 4	0,001 001	181,6	0,565 9
60	0,001 012	261,1	0,824 6	0,001 010	264,5	0,822 5
80	0,001 024	344,4	1,067	0,001 022	347,6	1,065
100	0,001 038	428,0	1,298	0,001 036	431,0	1,295
120	0,001 054	512,1	1,517	0,001 052	514,9	1,514
140	0,001 073	596,7	1,727	0,001 070	599,4	1,723
160	0,001 094	682,2	1,929	0,001 091	684,6	1,925
180	0,001 118	768,8	2,125	0,001 115	771,0	2,120
200	0,001 146	856,8	2,315	0,001 142	858,6	2 309
220	0,001 178	946,6	2,500	0,001 174	947,9	2 494
240	0,001 216	1 039	2,684	0,001 210	1 039	2,676
260	0,001 261	1 134	2,866	0,001 254	1 134	2,856
280	0,001 317	1 234	3,050	0,001 307	1 233	3,038
300	0,001 390	1 341	3,240	0,001 374	1 337	3,224
320	0,001 494	1 461	3,445	0,001 467	1 452	3,421
340	0,016 19	2 795	5,675	0,001 618	1 588	3,646
360	0,018 11	2 898	5,841	0,011 04	2 717	5,463
380	0,019 69	2 982	5,971	0,012 87	2 851	5,673
400	0,021 08	3 055	6,081	0,014 27	2 951	5,824
420	0,022 36	3 121	6,178	0,015 46	3 034	5,946
440	0,023 55	3 182	6,265	0,016 53	3 108	6,050
460	0,024 67	3 240	6,345	0,017 51	3 175	6,143
480	0,025 75	3 296	6,420	0,018 42	3 237	6,227
500	0,026 79	3 350	6,491	0,019 29	3 297	6,305
520	0,027 79	3 402	6,558	0,020 13	3 355	6,379
540	0,028 77	3 454	6,622	0,020 93	3 410	6,448
560	0,029 73	3 505	6,684	0,021 71	3 465	6,514
580	0,030 68	3 556	6,744	0,022 46	3 518	6,578
600	0,031 60	3 606	6,802	0,023 20	3 571	6,639
620	0,032 52	3 656	6,859	0,023 93	3 623	6,698
640	0,033 42	3 705	6,914	0,024 64	3 675	6,755

Toplinska svojstva pothlađene vode i pregrijane vodene pare pri temperaturi t i tlaku p *(konac)*

Temperatura t / °C	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)	Specifični obujam v / m³/kg	Specifična entalpija h / kJ/kg	Specifična entropija s / kJ/(kg K)
	p = 200 bar			p = 250 bar		
0	0,000 990 4	20,1	0,000 8	0,000 988 1	25,1	0,000 9
20	0,000 992 9	102,5	0,291 9	0,000 990 7	107,1	0,290 7
40	0,000 999 2	185,1	0,564 3	0,000 997 1	189,4	0,562 3
60	0,001 008	267,8	0,820 4	0,001 006	272,0	0,817 8
80	0,001 020	350,8	1,062	0,001 018	354,8	1,059
100	0,001 034	434,0	1,292	0,001 031	437,8	1,288
120	0,001 050	517,7	1,510	0,001 047	521,3	1,506
140	0,001 068	602,0	1,719	0,001 065	605,4	1,714
160	0,001 089	687,1	1,920	0,001 085	690,2	1,915
180	0,001 112	773,1	2,115	0,001 108	775,9	2,108
200	0,001 139	860,4	2,303	0,001 134	862,8	2,296
220	0,001 169	949,3	2,487	0,001 164	951,2	2,479
240	0,001 205	1 040	2,668	0,001 198	1 042	2,658
260	0,001 247	1 134	2,847	0,001 238	1 134	2,836
280	0,001 297	1 231	3,026	0,001 286	1 230	3,013
300	0,001 361	1 334	3,209	0,001 345	1 331	3,192
320	0,001 445	1 446	3,400	0,001 421	1 439	3,376
340	0,001 570	1 573	3,610	0,001 527	1 558	3,574
360	0,001 827	1 743	3,884	0,001 698	1 701	3,804
380	0,008 246	2 660	5,317	0,002 240	1 941	4,176
400	0,009 947	2 821	5,559	0,006 014	2 582	5,146
420	0,011 20	2 933	5,723	0,007 580	2 774	5,427
440	0,012 24	3 024	5,852	0,008 696	2 902	5,609
460	0,013 15	3 103	5,962	0,009 609	3 002	5,748
480	0,013 99	3 174	6,058	0,010 41	3 089	5,864
500	0,014 77	3 241	6,146	0,011 13	3 166	5,966
520	0,015 51	3 304	6,226	0,011 80	3 238	6,057
540	0,016 21	3 365	6,302	0,012 42	3 305	6,141
560	0,016 88	3 423	6,372	0,013 01	3 369	6,218
580	0,017 53	3 480	6,440	0,013 58	3 430	6,291
600	0,018 16	3 536	6,504	0,014 13	3 490	6,360
620	0,018 78	3 590	6,566	0,014 65	3 548	6,426
640	0,019 38	3 644	6,626	0,015 17	3 605	6,490

Vrela kapljevina i suhozasićena para rashladnih tvari pri temperaturi *t*

Temp. t / °C	Tlak p / bar	Specifični obujam v' / m^3/kg	v'' / m^3/kg	Specifična entalpija h' / kJ/kg	h'' / kJ/kg	Specifična entropija s' / kJ/(kg K)	s'' / kJ/(kg K)
			Amonijak NH_3				
–75	0,075	0,001 368	12,89	–331,2	1 145	–1,409	6,042
–70	0,109	0,001 379	9,009	–310,2	1 154	–1,307	5,903
–65	0,156	0,001 390	6,446	–289,1	1 163	–1,205	5,774
–60	0,219	0,001 401	4,699	–268,0	1 172	–1,103	5,653
–55	0,302	0,001 413	3,483	–246,8	1 181	–1,003	5,540
–50	0,409	0,001 425	2,623	–225,2	1 189	–0,905	5,433
–45	0,545	0,001 437	2,003	–203,1	1 197	–0,810	5,330
–40	0,718	0,001 449	1,550	–180,8	1 206	–0,714	5,237
–35	0,932	0,001 462	1,215	–158,6	1 214	–0,619	5,147
–30	1,195	0,001 476	0,963 0	–136,2	1 222	–0,527	5,062
–25	1,516	0,001 490	0,771 2	–113,7	1 230	–0,435	4,981
–20	1,903	0,001 504	0,623 6	–91,2	1 237	–0,345	4,903
–15	2,363	0,001 519	0,508 7	–68,6	1 244	–0,257	4,828
–10	2,909	0,001 534	0,418 4	–45,9	1 250	–0,170	4,757
–8	3,154	0,001 540	0,387 8	–36,8	1 253	–0,136	4,729
–6	3,414	0,001 546	0,359 9	–27,6	1 255	–0,102	4,702
–4	3,688	0,001 553	0,334 4	–18,5	1 258	–0,067	4,675
–2	3,982	0,001 559	0,311 1	–9,3	1 260	–0,033	4,649
0	4,294	0,001 566	0,289 7	0	1 262	0	4,623
2	4,625	0,001 573	0,270 0	9,3	1 265	0,033	4,597
4	4,975	0,001 580	0,252 0	18,5	1 267	0,067	4,572
6	5,345	0,001 587	0,235 3	27,8	1 269	0,100	4,546
8	5,736	0,001 594	0,220 0	37,1	1 271	0,134	4,521
10	6,149	0,001 601	0,205 8	46,5	1 273	0,166	4,497
15	7,284	0,001 619	0,174 9	70,0	1 277	0,248	4,437
20	8,572	0,001 639	0,149 4	93,7	1 281	0,329	4,379
25	10,028	0,001 659	0,128 3	117,6	1 284	0,409	4,322
30	11,665	0,001 680	0,110 7	141,7	1 287	0,488	4,267
35	13,499	0,001 702	0,095 9	166,0	1 289	0,566	4,212
40	15,544	0,001 725	0,083 3	190,6	1 291	0,644	4,159
45	17,814	0,001 750	0,072 6	215,3	1 292	0,721	4,106
50	20,327	0,001 777	0,063 5	240,2	1 293	0,798	4,054
55	23,101	0,001 806	0,055 7	265,4	1 293	0,876	4,002
60	26,145	0,001 837	0,048 9	291,4	1 292	0,955	3,951
65	29,478	0,001 870	0,043 0	318,3	1 290	1,032	3,900
70	33,118	0,001 905	0,037 9	346,2	1 287	1,109	3,849

Vrela kapljevina i suhozasićena para rashladnih tvari pri temperaturi *t* *(nastavak)*

Temp. t / °C	Tlak p / bar	Specifični obujam v' / m^3/kg	v'' / m^3/kg	Specifična entalpija h' / kJ/kg	h'' / kJ/kg	Specifična entropija s' / kJ/(kg K)	s'' / kJ/(kg K)
			Ugljični dioksid CO_2				
Krutina – para							
–100	0,139	0,000 627	2,336	–373	212	–1,676	1,704
–95	0,231	0,000 629	1,442	–368	215	–1,643	1,628
–90	0,372	0,000 632	0,920	–362	219	–1,612	1,556
–85	0,584	0,000 635	0,598	–356	221	–1,581	1,488
–80	0,896	0,000 639	0,398	–350	224	–1,549	1,422
–75	1,34	0,000 643	0,269	–344	226	–1,517	1,360
–70	1,98	0,000 647	0,185 4	–337	228	–1,482	1,299
–65	2,87	0,000 652	0,129 3	–329	230	–1,444	1,239
–60	4,10	0,000 657	0,091 2	–319	231	–1,400	1,180
–56,6	5,18	0,000 661	0,072 2	–313	231	–1,371	1,140
Kapljevina – para							
–56,6	5,18	0,000 849	0,072 2	–117	231	–0,467	1,140
–55	5,55	0,000 853	0,067 6	–114	231	–0,453	1,130
–50	6,84	0,000 857	0,055 4	–105	233	–0,410	1,101
–45	8,33	0,000 881	0,045 8	–95,0	234	–0,368	1,074
–40	10,05	0,000 897	0,038 2	–85,4	235	–0,327	1,048
–35	12,02	0,000 913	0,032 0	–75,8	236	–0,287	1,023
–30	14,27	0,000 931	0,027 0	–66,1	237	–0,248	0,998
–25	16,81	0,000 950	0,022 9	–56,5	237	–0,209	0,975
–20	19,67	0,000 971	0,019 5	–46,5	237	–0,170	0,951
–15	22,89	0,000 994	0,016 6	–36,0	237	–0,130	0,928
–10	26,47	0,001 019	0,014 2	–24,7	237	–0,089 2	0,905
–5	30,45	0,001 048	0,012 1	–13,0	236	–0,046 0	0,883
0	34,85	0,001 081	0,010 4	0	235	0	0,860
–5	39,72	0,001 120	0,008 85	13,0	232	0,043 1	0,831
–10	45,06	0,001 166	0,007 52	27,2	229	0,019 3	0,802
–15	50,93	0,001 223	0,006 32	42,3	223	0,142	0,768
–20	57,33	0,001 298	0,005 26	58,6	214	0,196	0,726
–25	64,32	0,001 417	0,004 17	78,7	198	0,263	0,663
–30	71,92	0,001 677	0,002 99	108	172	0,357	0,566
–31	73,51	0,002 156	0,002 16	140	140	0,460	0,460

Vrela kapljevina i suhozasićena para rashladnih tvari pri temperaturi *t*
(nastavak)

Temp.	Tlak	Specifični obujam		Specifična entalpija		Specifična entropija	
t / °C	p / bar	v' / m³/kg	v'' / m³/kg	h' / kJ/kg	h'' / kJ/kg	s' / kJ/(kg K)	s'' / kJ/(kg K)
			Sumporni dioksid SO_2				
–50	0,116	0,000 642	2,490 7	–68,29	355,5	–0,275 9	1,623 2
–40	0,216	0,000 652	1,387 2	–54,43	360,9	–0,215 6	1,565 9
–30	0,380	0,000 663	0,818 3	–40,74	366,2	–0,157 4	1,516 0
–20	0,635	0,000 674	0,507 1	–27,09	371,4	–0,102 6	1,471 2
–10	1,014	0,000 686	0,328 0	–13,57	376,4	–0,050	1,431 0
0	1,554	0,000 697	0,220 0	0	381,1	0	1,395 0
10	2,302	0,000 710	0,152 3	13,52	385,6	0,048 1	1,361 9
20	3,305	0,000 723	0,108 4	27,00	389,8	0,095 0	1,332 7
30	4,619	0,000 738	0,079 0	40,40	393,7	0,139 4	1,305 0
40	6,303	0,000 754	0,058 8	53,72	397,4	0,181 7	1,279 9
50	8,417	0,000 771	0,044 6	67,03	400,8	0,223 6	1,256 5
60	11,032	0,000 791	0,034 4	80,51	403,8	0,264 2	1,234 7
			Etan C_2H_6				
–50	5,517	0,002 003	0,098 3	–146,20	279,5	–0,571 9	1,335 6
–40	7,776	0,002 062	0,070 5	–120,16	287,0	–0,460 1	1,286 2
–30	10,650	0,002 128	0,051 5	–92,40	293,3	–0,346 2	1,240 1
–20	14,23	0,002 209	0,038 3	–63,30	298,3	–0,231 9	1,196 2
–10	18,59	0,002 305	0,028 8	–32,36	301,7	–0,115 9	1,153 5
0	23,85	0,002 429	0,021 8	0	303,3	0	1,110 3
10	30,16	0,002 587	0,016 1	35,38	299,6	0,121 4	1,054 7
20	37,75	0,002 856	0,011 4	76,19	286,6	0,255 4	0,972 6
30	47,07	0,003 49	0,007 1	134,35	250,0	0,440 5	0,813 5
32,1	49,33	0,004 70		191,55		0,625 5	
			Propan C_3H_8				
–50	0,707	0,001 690	0,580	–114,22	317,7	–0,465 9	1,467 5
–40	1,115	0,001 725	0,380	–92,19	330,3	–0,367 6	1,444 4
–30	1,672	0,001 761	0,260	–69,42	344,9	–0,271 7	1,431 9
–20	2,423	0,001 799	0,182	–46,72	356,7	–0,176 7	1,416 4
–10	3,405	0,001 842	0,131 8	–23,90	368,4	–0,087 9	1,402 6
0	4,684	0,001 887	0,097 4	0	378,7	0	1,386 2
10	6,339	0,001 935	0,073 1	24,24	388,4	0,085 4	1,371 6
20	8,337	0,001 992	0,056 1	49,99	397,5	0,170 8	1,359 9
30	10,807	0,002 055	0,043 5	74,69	405,7	0,257 1	1,349 8
40	13,739	0,002 135	0,033 9	102,19	413,0	0,342 1	1,334 3
50	17,269	0,002 222	0,026 8	130,79	420,2	0,428 3	1,323 4

Temp.	Tlak	Specifični obujam		Specifična entalpija		Specifična entropija	
t / °C	p / bar	v' / m³/kg	v'' / m³/kg	h' / kJ/kg	h'' / kJ/kg	s' / kJ/(kg K)	s'' / kJ/(kg K)
			Monoklormetan (metilklorid) CH_3Cl				
–60	0,156	0,000 936	2,235	–90,14	370,4	–0,372 6	1,788 2
–55	0,212	0,000 944	1,680	–83,02	373,5	–0,338 7	1,753 9
–50	0,280	0,000 953	1,295	–75,61	376,6	–0,301 4	1,721 2
–45	0,368	0,000 961	1,008	–68,29	379,6	–0,272 6	1,690 2
–40	0,475	0,000 970	0,794	–60,92	382,7	–0,240 7	1,661 7
–35	0,607	0,000 978	0,632	–53,47	385,7	–0,209 3	1,634 5
–30	0,768	0,000 986	0,508	–45,93	388,7	–0,177 9	1,608 9
–25	0,960	0,000 995	0,412	–38,48	391,5	–0,147 4	1,585 1
–20	1,189	0,001 003	0,338	–30,81	394,4	–0,117 2	1,562 5
–15	1,458	0,001 013	0,279	–23,19	397,3	–0,087 1	1,541 6
–10	1,773	0,001 022	0,233	–15,53	400,0	–0,057 8	1,521 1
–5	2,138	0,001 032	0,195	–7,79	402,6	–0,028 9	1,501 4
0	2,559	0,001 042	0,164 8	0	405,1	0	1,482 9
5	3,039	0,001 053	0,140 2	7,87	407,5	0,028 5	1,464 9
10	3,584	0,001 064	0,119 8	15,70	409,8	0,056 5	1,448 2
15	4,201	0,001 075	0,103 1	23,57	411,9	0,084 2	1,431 9
20	4,896	0,001 086	0,089 1	31,57	414,1	0,111 8	1,416 4
25	5,671	0,001 098	0,077 4	39,61	416,1	0,138 6	1,401 3
30	6,529	0,001 110	0,067 5	47,65	417,9	0,165 4	1,386 7
35	7,478	0,001 123	0,059 1	55,77	419,6	0,192 2	1,372 4
40	8,522	0,001 135	0,052 0	63,93	421,3	0,218 1	1,359 5
45	9,670	0,001 149	0,046 0	72,14	422,9	0,244 1	1,346 1
50	10,915	0,001 164	0,040 8	80,39	424,3	0,270 0	1,334 3
55	12,288	0,001 180	0,036 3	88,63	425,6	0,295 6	1,332 2
60	13,759	0,001 196	0,032 4	97,01	426,8	0,320 7	1,310 5
			Diklormetan (metilenklorid) CH_2Cl_2				
–20	0,055 9	–	4,14	–28,5	353	–0,112	1,399
–10	0,109	–	2,35	–14,2	358	–0,053 2	1,363
0	0,188	–	1,42	0	362	0	1,331
10	0,299	–	0,92	14,2	368	0,047 7	1,297
20	0,469	0,000 749	0,61	28,5	372	0,091 3	1,265
30	0,693		0,417	44,0	377	0,131	1,232
40	0,991	–	0,301	56,9	379	0,168	1,179
50	1,37	–	0,235	71,2	385	0,203	1,165

Vrela kapljevina i suhozasićena para rashladnih tvari pri temperaturi t
(nastavak)

Temp.	Tlak	Specifični obujam		Specifična entalpija		Specifična entropija	
t / °C	p / bar	v' / m³/kg	v'' / m³/kg	h' / kJ/kg	h'' / kJ/kg	s' / kJ/(kg K)	s'' / kJ/(kg K)
			Frigen 11-triklorfluormetan (CCl_3F)				
–50	0,027	0,609	5 061,25	160,54	365,23	0,840 9	1,758 2
–40	0,051	0,617	2 761,03	168,03	370,21	0,873 7	1,740 9
–30	0,092	0,625	1 594,67	175,72	375,26	0,906 0	1,726 7
–20	0,157	0,634	967,93	183,60	380,36	0,937 7	1,715 0
–10	0,256	0,642	613,55	191,70	385,49	0,969 1	1,705 5
0	0,401	0,652	403,97	200,00	390,63	1,000 0	1,697 9
10	0,607	0,662	275,00	208,53	395,77	1,030 6	1,691 9
20	0,889	0,672	192,78	217,26	400,88	1,060 9	1,687 2
30	1,266	0,683	138,68	226,20	405,96	1,090 7	1,683 7
40	1,755	0,694	102,06	235,32	410,97	1,120 2	1,681 2
50	2,379	0,707	76,63	244,62	415,91	1,149 3	1,679 4
60	3,159	0,720	58,57	254,08	420,75	1,178 0	1,678 3
70	4,117	0,734	45,46	263,66	425,47	1,206 1	1,677 7
80	5,275	0,749	35,77	273,38	430,07	1,233 8	1,677 5
90	6,659	0,766	28,47	283,20	434,51	1,260 9	1,677 6
100	8,291	0,784	22,89	293,12	438,77	1,287 5	1,677 9
110	10,198	0,804	18,56	303,15	442,83	1,313 6	1,678 2
120	12,407	0,826	15,15	313,30	446,64	1,339 3	1,678 5
130	14,946	0,851	12,42	323,59	450,15	1,364 6	1,678 6
140	17,846	0,880	10,21	334,08	453,29	1,389 7	1,678 3
150	21,145	0,914	8,39	344,87	455,96	1,414 8	1,677 4
160	24,881	0,955	6,88	356,13	458,00	1,440 3	1,675 5
170	29,102	1,008	5,59	368,14	459,13	1,466 8	1,672 1
180	33,864	1,081	4,46	381,47	458,79	1,495 4	1,666 0
190	39,233	1,205	3,39	397,77	455,38	1,529 6	1,654 0
198,01	44,025	1,824	1,82	430,65	430,65	1,598 4	1,598 4
			Frigen 12-difluordiklormetan (CCl_2F_2)				
–60	0,226	0,636	639,14	146,36	324,53	0,779 4	1,615 3
–50	0,392	0,647	384,12	155,06	329,30	0,819 2	1,600 0
–40	0,642	0,659	242,72	163,85	334,07	0,857 6	1,587 8
–30	1,005	0,672	160,01	172,72	338,80	0,894 8	1,577 9
–20	1,510	0,685	109,34	181,70	343,48	0,930 8	1,569 9
–10	2,193	0,700	77,03	190,78	348,06	0,965 9	1,563 6
0	3,089	0,716	55,68	200,00	352,54	1,000 0	1,558 5

Temp.	Tlak	Specifični obujam		Specifična entalpija		Specifična entropija	
t / °C	p / bar	v' / m³/kg	v'' / m³/kg	h' / kJ/kg	h'' / kJ/kg	s' / kJ/(kg K)	s'' / kJ/(kg K)
			Frigen 12-difluordiklormetan (CCl_2F_2) *(konac)*				
10	4,238	0,734	41,13	209,35	356,86	1,033 3	1,554 3
20	5,682	0,753	30,94	218,88	361,01	1,066 0	1,550 9
30	7,465	0,775	23,63	228,62	364,94	1,098 2	1,547 9
40	9,634	0,799	18,26	238,62	368,60	1,130 1	1,545 2
50	12,236	0,827	14,24	248,96	371,92	1,162 0	1,542 5
60	15,326	0,859	11,17	259,75	374,82	1,194 1	1,539 5
70	18,957	0,897	8,78	271,13	377,16	1,226 8	1,535 8
80	23,191	0,946	6,87	283,33	378,72	1,260 7	1,530 8
90	28,092	1,010	5,32	296,74	379,08	1,296 8	1,523 5
100	33,729	1,109	4,00	312,28	377,30	1,337 4	1,511 6
110	40,180	1,355	2,64	334,62	368,49	1,394 3	1,482 7
112,00	41,576	1,792	1,79	351,71	351,71	1,438 2	1,438 2
			Frigen 12 B1-bromklordifluormetan ($CBrClF_2$)				
–40	0,197	0,496	586,96	174,53	316,81	0,899 5	1,509 8
–30	0,327	0,504	368,06	180,58	320,64	0,924 9	1,501 0
–20	0,517	0,512	240,35	186,84	324,47	0,950 1	1,493 8
–10	0,787	0,521	162,58	193,32	328,27	0,975 2	1,488 0
0	1,157	0,530	113,39	200,03	332,03	1,000 0	1,483 4
10	1,651	0,540	81,21	206,87	335,73	1,024 6	1,479 7
20	2,294	0,550	59,53	213,91	339,34	1,048 9	1,476 5
30	3,111	0,562	44,53	221,11	342,87	1,072 9	1,474 6
40	4,130	0,574	33,89	228,46	346,29	1,096 6	1,472 9
50	5,380	0,587	26,17	235,96	349,59	1,119 9	1,471 6
60	6,889	0,601	20,47	243,60	352,76	1,142 9	1,470 6
70	8,689	0,617	16,17	251,40	355,77	1,165 7	1,469 8
80	10,811	0,635	12,87	259,39	358,60	1,188 2	1,469 2
90	13,292	0,656	10,30	267,62	361,20	1,210 8	1,468 5
100	16,170	0,679	8,25	276,17	363,51	1,233 5	1,467 5
110	19,489	0,707	6,60	285,20	365,42	1,256 8	1,466 1
120	23,300	0,741	5,22	294,96	366,77	1,281 2	1,463 8
130	27,662	0,786	4,05	305,83	367,19	1,307 6	1,459 9
140	32,649	0,851	3,01	318,53	365,93	1,337 8	1,452 5
150	38,347	0,980	2,01	334,39	360,96	1,374 4	1,437 2
154,60	41,237	1,403	1,40	351,77	351,77	1,414 5	1,414 5

Vrela kapljevina i suhozasićena para rashladnih tvari pri temperaturi *t* *(nastavak)*

Temp. t / °C	Tlak p / bar	Specifični obujam v' / m³/kg	v'' / m³/kg	Specifična entalpija h' / kJ/kg	h'' / kJ/kg	Specifična entropija s' / kJ/(kg K)	s'' / kJ/(kg K)
			Frigen 13-trifluormonoklormetan ($CClF_3$)				
-120	0,070	0,601	1 737,84	83,83	249,73	0,456 1	1,539 4
-110	0,160	0,614	800,20	91,81	254,10	0,506 5	1,501 3
-100	0,331	0,628	407,72	100,07	258,35	0,555 6	1,469 7
-90	0,626	0,643	225,59	108,69	262,50	0,603 9	1,443 7
-80	1,097	0,659	133,53	117,70	266,53	0,651 6	1,422 2
-70	1,807	0,677	83,54	127,06	270,41	0,698 6	1,404 3
-60	2,824	0,696	54,69	136,73	274,09	0,744 7	1,389 2
-50	4,219	0,718	37,17	146,66	277,53	0,789 8	1,376 3
-40	6,068	0,742	26,03	156,79	280,68	0,833 6	1,365 0
-30	8,449	0,771	18,66	167,12	283,47	0,876 3	1,354 8
-20	11,447	0,804	13,61	177,67	285,82	0,917 8	1,345 0
-10	15,155	0,844	10,03	188,54	287,57	0,958 7	1,335 1
0	19,682	0,895	7,40	200,00	288,47	1,000 0	1,323 9
10	25,160	0,965	5,40	212,60	287,99	1,043 5	1,309 7
20	31,759	1,082	3,76	227,89	284,69	1,094 1	1,287 9
28,78	38,649	1,721	1,72	260,93	260,93	1,201 8	1,201 8
			Frigen 13 B1-trifluorbrommetan ($CBrF_3$)				
-80	0,305	0,479	347,88	144,78	269,34	0,765 7	1,410 6
-70	0,542	0,489	203,94	150,85	272,75	0,796 0	1,396 1
-60	0,908	0,500	126,26	157,19	276,12	0,826 2	1,384 2
-50	1,445	0,511	81,84	163,78	279,43	0,856 1	1,374 3
-40	2,199	0,523	55,14	170,60	282,64	0,885 7	1,366 2
-30	3,222	0,537	38,37	177,66	285,74	0,914 9	1,359 4
-20	4,567	0,552	27,43	184,92	288,70	0,943 7	1,353 7
-10	6,292	0,568	20,05	192,37	291,47	0,972 1	1,348 7
0	8,454	0,587	14,92	200,00	294,01	1,000 0	1,344 2
10	11,117	0,609	11,25	207,84	296,28	1,027 5	1,339 9
20	14,347	0,635	8,56	215,94	298,19	1,059 4	1,335 4
30	18,223	0,667	6,54	224,42	299,61	1,082 4	1,330 4
40	22,831	0,708	4,97	233,47	300,30	1,110 7	1,324 1
50	28,277	0,767	3,71	243,61	299,81	1,141 2	1,315 1
60	34,693	0,872	2,62	256,26	296,72	1,178 1	1,299 5
67,0	39,846	1,343	1,34	279,02	279,02	1,243 9	1,243 9

Vrela kapljevina i suhozasićena para rashladnih tvari pri temperaturi *t* *(nastavak)*

Temp. t / °C	Tlak p / bar	Specifični obujam v' / m³/kg	v'' / m³/kg	Specifična entalpija h' / kJ/kg	h'' / kJ/kg	Specifična entropija s' / kJ/(kg K)	s'' / kJ/(kg K)
			Frigen 14-tetraflurmetan (CF_4)				
-140	0,395	0,589	311,14	160,71	301,56	0,745 0	1,802 9
-130	0,874	0,608	148,30	169,82	305,23	0,810 7	1,756 7
-120	1,724	0,630	78,41	179,43	308,59	0,875 2	1,718 6
-110	3,097	0,654	44,91	189,51	311,55	0,938 4	1,686 5
-100	5,162	0,683	27,35	200,00	314,01	1,000 0	1,658 3
-90	8,096	0,717	17,44	210,87	315,86	1,059	1,633 1
-80	12,085	0,759	11,47	222,13	316,91	1,118 2	1,608 9
-70	17,336	0,815	7,65	233,98	316,83	1,175 9	1,583 7
-60	24,115	0,897	5,05	246,97	314,73	1,235 3	1,553 4
-50	32,846	1,065	3,01	263,92	307,08	1,309 2	1,502 6
-45,65	37,460	1,598	1,60	286,08	286,08	1,404 8	1,404 8
			Frigen 22-difluromonoklormetan ($CHClF_2$)				
-100	0,021	0,639	7 906,83	95,96	357,78	0,534 0	2,046 1
-90	0,049	0,649	3 556,81	104,62	362,77	0,582 6	1,992 1
-80	0,105	0,659	1 757,88	113,62	367,85	0,630 4	1,946 6
-70	0,206	0,671	940,11	123,02	372,97	0,677 7	1,908 1
-60	0,376	0,683	537,29	132,84	378,07	0,724 8	1,875 4
-50	0,646	0,695	324,82	143,11	383,09	0,771 8	1,847 3
-40	1,053	0,709	205,95	153,81	387,97	0,818 6	1,822 9
-30	1,640	0,724	135,98	164,90	392,65	0,864 9	1,801 6
-20	2,455	0,740	92,93	176,34	397,07	0,910 8	1,782 8
-10	3,550	0,758	65,40	188,06	401,18	0,955 9	1,765 8
0	4,980	0,778	47,18	200,00	404,93	1,000 0	1,750 3
10	6,803	0,799	34,75	212,11	408,27	1,043 0	1,735 8
20	9,081	0,824	26,04	224,34	411,14	1,084 8	1,722 1
30	11,880	0,852	19,78	236,69	413,48	1,125 5	1,708 6
40	15,269	0,884	15,17	249,22	415,19	1,165 1	1,695 2
50	19,327	0,923	11,70	262,03	416,11	1,204 2	1,681 1
60	24,146	0,970	9,03	275,41	415,99	1,243 6	1,665 6
70	29,833	1,032	6,92	289,86	414,35	1,284 7	1,647 5
80	36,520	1,120	5,17	306,49	410,12	1,330 4	1,623 8
90	44,373	1,282	3,59	328,61	399,75	1,389 4	1,585 3
96,18	49,900	1,949	1,95	366,83	366,83	1,491 3	1,421 3

Vrela kapljevina i suhozasićena para rashladnih tvari pri temperaturi t *(nastavak)*

Temp. t / °C	Tlak p / bar	Specifični obujam v' / m³/kg	Specifični obujam v'' / m³/kg	Specifična entalpija h' / kJ/kg	Specifična entalpija h'' / kJ/kg	Specifična entropija s' / kJ/(kg K)	Specifična entropija s'' / kJ/(kg K)
Frigen 23-trifluormetan (CHF_3)							
-120	0,059	0,623	3 082,91	40,76	307,99	0,253 3	1,998 2
-110	0,144	0,638	1 331,81	51,57	312,96	0,321 7	1,923 8
-100	0,315	0,653	642,22	62,99	317,81	0,389 5	1,861 2
-90	0,623	0,670	338,66	75,00	322,41	0,456 8	1,807 7
-80	1,139	0,689	192,12	87,58	326,66	0,523 5	1,761 3
-70	1,947	0,709	115,73	100,64	330,47	0,589 1	1,720 5
-60	3,140	0,732	73,23	114,07	333,77	0,653 2	1,684 0
-50	4,827	0,757	48,25	127,75	336,50	0,715 4	1,650 9
-40	7,120	0,785	32,84	141,62	338,63	0,775 4	1,620 4
-30	10,142	0,818	22,93	155,66	340,11	0,833 3	1,591 9
-20	14,030	0,857	16,31	169,94	340,87	0,889 6	1,564 8
-10	18,936	0,904	11,75	184,63	340,77	0,944 8	1,538 2
0	25,043	0,966	8,50	200,00	339,57	1,000 0	1,511 0
10	32,579	1,053	6,14	216,54	336,79	1,056 7	1,481 4
20	41,842	1,213	4,36	236,48	331,00	1,122 3	1,444 7
26,30	48,739	1,898	1,90	286,03	286,03	1,285 1	1,285 1
Frigen 113-triklortrifluoretan ($C_2Cl_3F_3$)							
-35	0,020	0,590	5 229,12	170,18	337,45	0,883 3	1,585 7
-30	0,028	0,593	3 854,33	174,30	340,50	0,900 4	1,584 0
-20	0,051	0,601	2 184,34	182,67	346,66	0,934 2	1,582 0
-10	0,089	0,609	1 301,93	191,24	352,93	0,967 4	1,581 8
0	0,148	0,617	811,11	200,00	359,29	1,000 0	1,583 2
10	0,236	0,626	525,40	208,96	365,71	1,032 2	1,585 8
20	0,363	0,635	352,22	218,12	372,19	1,064 0	1,589 6
30	0,539	0,644	243,40	227,50	378,71	1,095 4	1,594 2
40	0,778	0,654	172,77	237,07	385,25	1,126 4	1,599 6
50	1,094	0,665	125,58	246,83	391,79	1,157 0	1,605 6
60	1,501	0,676	93,22	256,78	398,32	1,187 2	1,612 1
70	2,018	0,688	70,49	266,89	404,82	1,217 0	1,619 0
80	2,659	0,701	54,18	277,16	411,28	1,246 4	1,626 2
90	3,444	0,714	42,25	278,58	417,69	1,275 3	1,633 6
100	4,390	0,729	33,37	298,13	424,03	1,303 8	1,641 2
110	5,518	0,745	26,63	308,82	430,29	1,331 9	1,648 9
120	6,847	0,763	21,45	319,64	436,45	1,359 5	1,656 6

Vrela kapljevina i suhozasićena para rashladnih tvari pri temperaturi t *(nastavak)*

Temp. t / °C	Tlak p / bar	Specifični obujam v' / m³/kg	Specifični obujam v'' / m³/kg	Specifična entalpija h' / kJ/kg	Specifična entalpija h'' / kJ/kg	Specifična entropija s' / kJ/(kg K)	Specifična entropija s'' / kJ/(kg K)
Frigen 113-triklortrifluoretan ($C_2Cl_3F_3$) *(konac)*							
130	8,397	0,783	17,41	330,62	442,49	1,386 8	1,664 3
140	10,193	0,805	14,20	341,78	448,37	1,413 8	1,671 8
150	12,257	0,830	11,62	353,18	454,02	1,440 6	1,679 0
160	14,618	0,859	9,52	364,88	459,35	1,467 5	1,685 6
170	17,306	0,893	7,77	376,93	464,16	1,494 5	1,691 3
180	20,355	0,936	6,29	389,45	468,15	1,521 8	1,695 5
190	23,808	0,992	5,00	402,49	470,67	1,549 5	1,696 7
200	27,712	1,075	3,84	415,96	470,17	1,577 4	1,692 0
210	32,197	1,246	2,69	429,07	461,81	1,603 8	1,671 6
214,10	34,10	1,735	1,74	440,04	440,04	1,625 8	1,625 8
Frigen 114 – diklortetrofluoretan ($C_2Cl_2F_4$)							
-50	0,071	0,596	1 516,17	153,53	306,38	0,812 8	1,497 7
-40	0,130	0,606	863,76	162,28	312,55	0,851 1	1,495 6
-30	0,225	0,616	519,35	171,30	318,82	0,889 0	1,495 7
-20	0,369	0,627	327,17	180,59	325,18	0,926 4	1,497 6
-10	0,581	0,638	214,58	190,16	331,61	0,963 4	1,500 9
0	0,879	0,650	145,75	200,00	338,08	1,000 0	1,505 5
10	1,285	0,663	102,04	210,09	344,57	1,036 2	1,511 2
20	1,824	0,677	73,34	220,45	351,06	1,072 0	1,517 6
30	2,520	0,692	53,92	231,01	357,51	1,107 3	1,524 6
40	3,401	0,709	40,42	241,79	363,90	1,142 0	1,532 0
50	4,494	0,727	30,81	252,75	370,20	1,176 2	1,539 7
60	5,828	0,747	23,80	263,88	376,37	1,209 1	1,547 6
70	7,433	0,769	18,60	275,20	382,38	1,243 0	1,555 3
80	9,343	0,794	14,65	286,69	388,16	1,275 6	1,562 9
90	11,594	0,823	11,60	298,42	393,65	1,307 8	1,570 1
100	14,225	0,857	9,20	310,44	398,72	1,339 9	1,576 5
110	17,282	0,898	7,27	322,92	403,20	1,372 2	1,581 7
120	20,821	0,952	5,68	336,12	406,76	1,405 3	1,585 0
130	24,908	1,029	4,31	350,63	408,71	1,440 7	1,584 8
140	29,622	1,173	3,01	368,16	406,59	1,482 4	1,575 4
145,7	32,627	1,730	1,73	390,14	390,14	1,534 2	1,534 2

Vrela kapljevina i suhozasićena para rashladnih tvari pri temperaturi t
(nastavak)

Temp. t / °C	Tlak p / bar	Specifični obujam v' / m³/kg	v'' / m³/kg	Specifična entalpija h' / kJ/kg	h'' / kJ/kg	Specifična entropija s' / kJ/(kg K)	s'' / kJ/(kg K)
Frigen 115-klorpentafluoretan (C_2ClF_5)							
-60	0,346	0,617	323,97	143,05	279,68	0,774 7	1,406 3
-50	0,591	0,630	196,58	153,57	284,58	0,813 7	1,400 8
-40	0,957	0,645	125,19	162,37	289,47	0,852 2	1,397 3
-30	1,479	0,660	83,05	171,43	294,33	0,890 1	1,395 5
-20	2,197	0,677	57,04	180,74	299,14	0,927 4	1,395 1
-10	3,153	0,695	40,32	190,27	303,86	0,964 0	1,395 7
0	4,391	0,716	29,20	200,00	308,47	1,000 0	1,397 1
10	5,957	0,739	21,56	209,94	312,93	1,035 3	1,399 1
20	7,902	0,765	16,16	220,11	317,18	1,070 1	1,401 3
30	10,279	0,796	12,24	230,55	321,15	1,104 5	1,403 4
40	13,149	0,833	9,31	241,39	324,70	1,138 9	1,405 0
50	16,584	0,880	7,06	252,84	327,61	1,174 0	1,405 4
60	20,670	0,945	5,27	265,35	329,41	1,211 0	1,403 3
70	25,515	1,048	3,75	280,03	328,90	1,253 0	1,395 4
80,0	31,257	1,691	1,69	310,48	310,48	1,338 1	1,338 1
Frigen 500 – Azeotropna smjesa: maseni udio frigena 12 (CCl_2F_2) 73,8 % i R 152a (CH_3–CHF_2) 26,2 %							
-40	0,756	0,741	248,94	157,54	362,19	0,832 9	1,710 7
-30	1,181	0,756	164,06	167,95	367,42	0,876 5	1,696 9
-20	1,773	0,772	112,00	178,49	372,55	0,918 8	1,685 4
-10	2,574	0,790	78,76	189,17	377,56	0,959 9	1,675 8
0	3,625	0,809	56,80	200,00	382,40	1,000 0	1,667 8
10	4,975	0,830	41,84	211,05	387,06	1,039 3	1,661 0
20	6,674	0,853	31,36	222,36	391,49	1,078 1	1,655 0
30	8,776	0,878	23,84	234,01	395,63	1,116 5	1,649 7
40	11,338	0,908	18,32	246,09	399,41	1,155 0	1,644 6
50	14,420	0,942	14,19	258,73	402,73	1,193 8	1,639 5
60	18,089	0,983	11,03	272,11	405,41	1,233 5	1,633 7
70	22,414	1,034	8,55	286,48	407,20	1,274 7	1,626 6
80	27,471	1,100	6,57	302,26	407,62	1,318 5	1,616 9
90	33,342	1,198	4,92	320,30	405,65	1,367 0	1,602 0
100	40,118	1,387	3,40	343,18	397,83	1,426 7	1,573 2
105,5	44,265	2,014	2,01	373,21	373,21	1,504 7	1,504 7

Vrela kapljevina i suhozasićena para rashladnih tvari pri temperaturi t
(konac)

Temper t / °C	Tlak p / bar	Specifični obujam v' / m³/kg	v'' / m³/kg	Specifična entalpija h' / kJ/kg	h'' / kJ/kg	Specifična entropija s' / kJ/kg K	s'' / kJ/kg K
Frigen 502 – Azeotropna smjesa: maseni udio frigena 22 ($CHClF_2$) 48,8 % i frigena 115 (C_2ClF_5) 51,2 %							
-65	0,369	0,648	411,90	135,70	315,56	0,734 6	1,598 7
-60	0,487	0,655	318,29	139,93	318,10	0,754 6	1,590 5
-50	0,814	0,668	197,26	148,77	323,16	0,795 0	1,576 5
-40	1,296	0,683	127,69	158,08	328,14	0,835 7	1,565 1
-30	1,979	0,699	85,77	167,88	333,02	0,876 6	1,555 8
-20	2,910	0,716	59,46	178,15	337,76	0,917 7	1,548 3
-10	4,143	0,735	42,34	188,87	342,31	0,958 9	1,542 0
0	5,731	0,756	30,84	200,00	346,63	1,000 0	1,536 8
10	7,731	0,780	22,88	211,53	350,67	1,040 9	1,532 3
20	10,197	0,807	17,23	223,42	354,36	1,081 5	1,528 2
30	13,189	0,838	13,12	235,67	357,62	1,121 8	1,524 0
40	16,770	0,877	10,05	248,29	360,30	1,161 7	1,519 4
50	21,013	0,925	7,70	261,36	362,17	1,201 6	1,513 6
60	26,014	0,990	5,84	275,13	362,77	1,242 1	1,505 2
70	31,918	1,091	4,29	290,47	360,95	1,285 6	1,491 0
80	39,005	1,342	2,71	312,82	350,66	1,347 3	1,454 5
82,16	40,748	1,784	1,78	331,82	331,82	1,400 2	1,400 2
Frigen 503 – Azeotropna smjesa: maseni udio frigena 13 ($CClF_3$) 59,9 % i frigena 23 (CHF_3) 40,1 %							
-120	0,100	0,641	1 444,48	61,29	260,22	0,351 5	1,650 5
-110	0,231	0,651	663,18	71,23	264,55	0,414 3	1,599 3
-100	0,476	0,662	337,91	81,50	268,79	0,475 3	1,557 0
-90	0,894	0,675	187,29	92,04	272,86	0,534 4	1,521 7
-80	1,560	0,690	111,13	102,83	276,73	0,591 3	1,491 8
-70	2,554	0,707	69,68	113,82	280,34	0,646 6	1,466 3
-60	3,968	0,727	45,69	124,99	283,64	0,699 8	1,444 1
-50	5,898	0,750	31,05	136,32	286,58	0,751 1	1,424 4
-40	8,448	0,778	21,69	147,88	289,08	0,800 9	1,406 5
-30	11,728	0,811	15,46	159,74	291,00	0,849 6	1,389 4
-20	15,858	0,852	11,16	172,12	292,15	0,898 1	1,372 2
-10	20,974	0,905	8,08	185,33	292,16	0,947 5	1,353 5
0	27,230	0,978	5,78	200,00	290,31	1,000 0	1,330 6
10	34,809	1,093	3,95	217,47	284,68	1,060 0	1,297 3
19,5	43,432	1,773	1,77	253,71	253,71	1,181 4	1,181 4

Promjene stanja pare računamo pomoću tablica odnosno dijagrama za vodenu paru (Oznake veličine – v. str. 187 ... 190 i 198).

a) Izohora $V = \text{const}$ $v = 1/\varrho = V/m = \text{const}$

Za određeni tlak p uz odgovarajuće vrijednosti v' i v'' vrijedi:

$v < v'$	pothlađena kapljevina
v'	vrela kapljevina
$v' < v < v''$	mokra para
v''	suhozasićena para
$v'' < v$	pregrijana para.

Odgovarajuće temperature i ostale veličine određujemo iz tablica ili dijagrama.

Mehanički rad: $W = 0$

Toplina: $Q = m\,(h_2 - h_1) - V(p_2 - p_1)$

b) Izobara i izoterma

U području mokre pare svakom tlaku p odgovara točno određena temperatura T_s. Izobara je, dakle, ovdje identična s izotermom, dok se izvan područja *mokre* pare od nje bitno razlikuje.

$p = \text{const}$	mehanički rad:	$W = p(V_2 - V_1)$
	toplina:	$Q = H_2 - H_1 = m\,(h_2 - h_1)$
$T = \text{const}$	mehanički rad:	$W = \int p\,\mathrm{d}V$
	toplina:	$Q = T(S_2 - S_1) = m\,T\,(s_2 - s_1)$

c) Izentropa

Kao kod plinova, rabimo i kod para za izentropu jednadžbu

$$pV^{\varkappa} = \text{const}$$

gdje je $\varkappa$ samo empirijski određena vrijednost i nije u nikakvoj vezi sa specifičnim toplinskim kapacitetima c_p i c_V (u zasićenom je području $c_p = \infty$).

Vrijednost $\varkappa$ je za vodenu paru u:

pregrijanom području ($p < 25$ bar) $\varkappa = 1{,}30$

zasićenom području za:

- suhozasićenu paru ($x \approx 1$) $\varkappa = 1{,}135$
- mokru paru ($x > 0{,}75$) $\varkappa = 1{,}035 + 0{,}1\,x$.

d) Prigušivanje pare $h_1 = h_2$

Za razliku od plinova, za koje pri prigušivanju vrijedi $T_1 = T_2$, temperatura se pare pri prigušivanju mijenja (»Joule-Thomsonov efekt«)

$$T_1 \neq T_2\,.$$

Ispod određene temperature (»temperatura inverzije«) temperatura pare pri prigušivanju pada, a iznad nje raste. Temperatura ie inverzije šesterostruka do sedmerostruka vrijednost kritične temperature K.

Ukupni tlak smjese jednak je zbroju parcijalnih tlakova sastavina smjese (kao kod smjesa plinova – v. str. 197).

Po Daltonovu je zakonu smjesa pare i plina u ravnoteži s kapljevinom koja ishlapljuje kad parcijalni tlak pare p' dosegne tlak zasićene pare p_s pri odgovarajućoj temperaturi. To je stanje zasićenosti smjese.

Stanje zasićenosti se narušava promjenom temperature. Povećanjem temperature raste tlak zasićene pare ($p_s > p'$), smjesa postaje nezasićenom (a para u njoj pregrijanom), te je sposobna primiti nove količine pare koje počinje ishlapljivati iz kapljevine (sušenje). Padom temperature pada i tlak zasićene pare ($p_s < p'$), smjesa više ne može zadržati sve količine pare pa se iz nje počinje izlučivati suvišak kapljevine (rošenje).

Smjesa zraka i vodene pare (vlažan zrak)

Sadržaj vlage x je omjer mase vodene pare m_v i mase suhog zraka m_z u vlažnom zraku:

$$x = m_v/m_z = (R_z/R_v)p'/(p - p') = 0{,}622\,p'/(p - p').$$

Plinske konstante za zrak i vodenu paru:

$R_z = 0{,}287$ kJ/(kg K) $R_v = R_m/M = 8{,}314/18$ kg/kmol $= 0{,}462$ kJ/(kg K)

gdje su: p' parcijalni tlak vodene pare, p ukupni tlak smjese, $p - p' = p_z$ je parcijalni tlak suhog zraka.

Sadržaj vlage pri zasićenju ($p' = p_s$): $x_s = 0{,}622\,p_s/(p - p_s)$

Stupanj zasićenosti: $\psi = x/x_s$

Relativna vlažnost φ je omjer parcijalnog tlaka vodene pare p' i tlaka zasićenja p_s

$$\varphi = p'/p_s \qquad (\approx \psi)$$

Specifična entalpija smjese h (kJ/kg)* u nezasićenom području s obzirom na ishodište pri ledištu vode, (gdje je $h = 0$) bit će

$$h = c_{pz}t + x\,(c_{pv}t + r)$$

gdje je:

specifični toplinski kapacitet zraka	$c_{pz} = 1{,}005$ kJ/(kg K)
specifični toplinski kapacitet vodene pare	$c_{pv} = 1{,}926$ kJ/(kg K)
specifična toplina isparivanja vode (pri 0 °C)	$r = 2\,500$ kJ/kg

t je temperatura u °C pa je

$$h = 1{,}005\,t + x\,(1{,}926\,t + 2\,500).$$

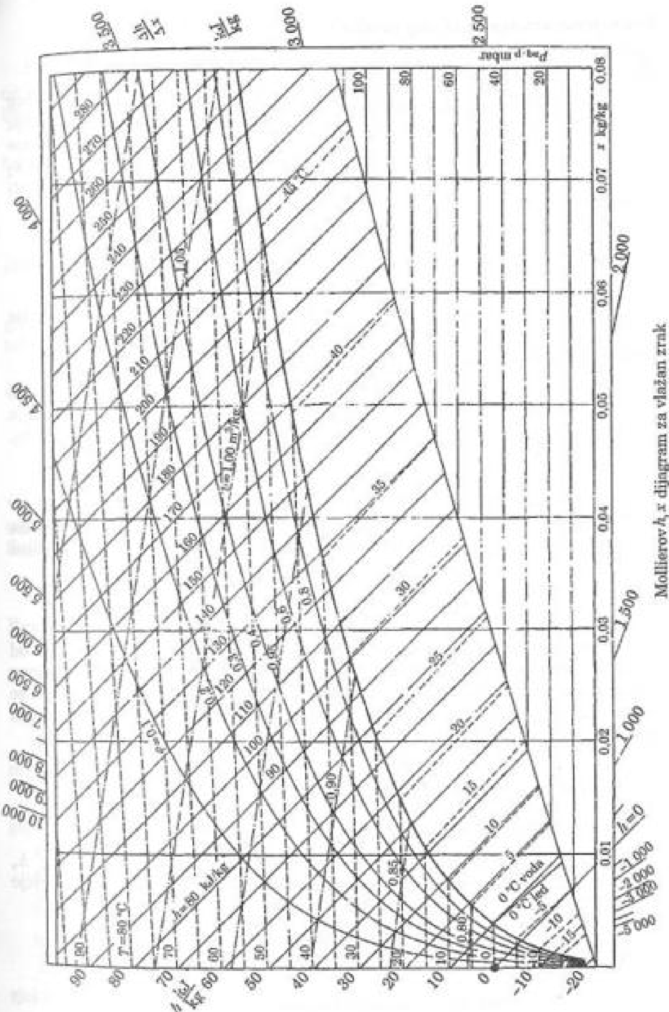
Pri potpunom zasićenju ($p' = p_s$, $x = x_s$) je $h = h_s$.

Toplinska svojstva suhog i zasićenog zraka pri raznim temperaturama su predočena na str. 232. Sve se promjene stanja vlažnog zraka najbolje mogu pratiti u Mollierovu h, x dijagramu za vlažni zrak (v. str. 233).

* Specifična vrijednost odnosi se na 1 kg suhog zraka u vlažnoj smjesi, odn. na $(1 + x)$ kg vlažne smjese.

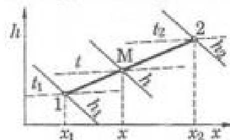
Toplinska svojstva suhog i zasićenog vlažnog zraka pri tlaku p = 1 bar i temperaturi t

Temperatura	Zasićeni vlažni zrak: parcijalni tlak pare	Zasićeni vlažni zrak: sadržaj vlage	Zasićeni vlažni zrak: specifična entalpija	Zasićeni vlažni zrak: specifični obujam	Suhi zrak: specifična entalpija	Suhi zrak: specifični obujam
t / °C	p_s / mbar	x / kg/kg	h / kJ/kg	v / m³/kg	h / kJ/kg	v / m³/kg
-20	1,031	0,000 642	−18,53	0,727	-20,11	0,727
-18	1,248	0,000 777	−16,18	0,733	-18,10	0,733
-16	1,505	0,000 938	−13,77	0,739	-16,09	0,738
-14	1,810	0,001 128	−11,29	0,745	-14,08	0,744
-12	2,171	0,001 353	−8,71	0,750	-12,07	0,750
-10	2,596	0,001 619	−6,04	0,756	-10,06	0,756
-8	3,097	0,001 932	−3,24	0,762	-8,04	0,761
-6	3,684	0,002 300	−0,31	0,768	-6,03	0,767
-4	4,371	0,002 731	+2,78	0,774	-4,02	0,773
-2	5,172	0,003 234	6,06	0,780	-2,01	0,778
0	6,106	0,003 821	9,55	0,786	0	0,784
2	7,055	0,004 419	13,08	0,792	2,01	0,790
4	8,129	0,005 098	16,80	0,798	4,02	0,796
6	9,345	0,005 868	20,77	0,804	6,03	0,801
8	10,72	0,006 740	24,99	0,810	8,04	0,807
10	12,27	0,007 727	29,52	0,817	10,06	0,813
12	14,01	0,008 841	34,36	0,823	12,07	0,819
14	15,97	0,010 10	39,58	0,829	14,08	0,824
16	18,17	0,011 51	45,20	0,836	16,09	0,830
18	20,62	0,013 10	51,28	0,842	18,10	0,836
20	23,37	0,014 88	57,87	0,849	20,11	0,842
22	26,42	0,016 88	65,01	0,856	22,12	0,847
24	29,82	0,019 12	72,78	0,863	24,13	0,853
26	33,60	0,021 62	81,25	0,870	26,14	0,859
28	37,78	0,024 42	90,49	0,877	28,15	0,865
30	42,42	0,027 55	100,6	0,885	30,17	0,870
32	47,53	0,031 04	111,6	0,892	32,18	0,876
34	53,18	0,034 94	123,7	0,900	34,19	0,882
36	59,40	0,039 28	137,0	0,908	36,20	0,888
38	66,24	0,044 12	151,6	0,916	38,21	0,893
40	73,75	0,049 53	167,7	0,925	40,22	0,899
42	81,99	0,055 55	185,5	0,934	42,23	0,905
44	91,00	0,062 27	205,0	0,943	44,24	0,911
46	100,9	0,069 77	226,7	0,953	46,25	0,916
48	111,6	0,078 15	250,6	0,963	48,26	0,922
50	123,4	0,087 52	277,2	0,973	50,28	0,928
55	157,4	0,116 2	357,7	1,002	55,30	0,942
60	199,2	0,154 7	464,5	1,034	60,33	0,957
65	250,1	0,207 4	609,1	1,072	65,36	0,971
70	311,6	0,281 6	811,1	1,117	70,39	0,985
75	385,5	0,390 2	1 106	1,170	75,41	1,000
80	473,6	0,559 6	1 563	1,235	80,44	1,014
85	578,0	0,852 1	2 351	1,316	85,47	1,028
90	701,1	1,459	3 983	1,418	90,50	1,043
95	845,3	3,398	9 193	1,553	95,52	1,057



Mollierov h, x dijagram za vlažan zrak

Promjene stanja vlažnog zraka



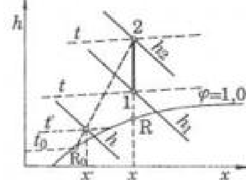
1. Miješanje struje vlažnog zraka

Miješa li se vlažni zrak, protočne mase suhog zraka q_{m1}, temperature t_1 i vlažnosti x_1 (stanje u točki 1) s vlažnim zrakom, protočne mase suhog zraka q_{m2}, temperature t_2 i vlažnosti x_2 (stanje u točki 2), to će se za smjesu proračunati

sadržaj vlage: $x = (q_{m1} x_1 + q_{m2} x_2)/(q_{m1} + q_{m2})$
specifična entalpija: $h = (q_{m1} h_1 + q_{m2} h_2)/(q_{m1} + q_{m2})$
temperatura u °C: $t = (h - x\,r)/(c_{pz} + x c_{pv})$
$= (h - 2500\,x)/(1{,}005 + 1{,}926\,x)$.

Sve se te veličine mogu izravno očitati iz dijagrama h, x za stanje smjese u točki M, koja je određena omjerom $\overline{M2}/\overline{M1} = q_{m1}/q_{m2}$.

2. Promjena stanja pri p = const (izobara)



Pri zagrijavanju (od stanja 1 do 2) ugrije se vlažni zrak za temperaturnu razliku $t_2 - t_1$ a specifična se entalpija povećava od h_1 do h_2, pa je stoga potrebno dovoditi toplinu

$$\Phi = q_{mz}\,(h_2 - h_1)$$

gdje je q_{mz} protočna masa suhoga zraka.

Pri hlađenju među istim stanjima vlažnoga zraka (od 2 do 1) valja istu količinu topline Q odvesti.

3. Hlađenje do temperature pod rosištem

Pri hlađenju rashladnom površinom, koja ima temperaturu t_0 nižu od temperature rosišta (R), može se smatrati da je nastalo miješanje vlažnog zraka stanja 2 i graničnog sloja na rashladnoj površini stanja R_0, pri čemu se vlažni zrak ohladi do temperature t' ($< t_1$), a time i osuši. Vlažnost se smanjila od x do x', jer se izlučila masa vode $m_z\,(x - x')$. Toplinu koju treba odvesti

$$\Phi = q_{mz}\,[h_2 - h' - (x - x')t']$$

gdje je t konačna temperatura u °C.

4. Vlaženje vodom ili vodenom parom

Dodavanjem mase m_v vode ili vodene pare, specifične entalpije h_v vlažnom zraku, mase suhoga zraka m_z, vlažnosti x_1 i specifične entalpije h_1, dobivamo

vlažnost smjese: $$x_2 = x_1 + \frac{q_{mv}}{q_{mz}}$$

specifičnu entalpiju smjese: $$h_2 = h_1 + h_v\,\frac{q_{mv}}{q_{mz}}.$$

Pri stacionarnom strujanju (pri kojem se na bilo kojem mjestu brzina ne mijenja s vremenom ni po veličini ni po smjeru) protočna je masa q_m konstantna, dok su druge veličine promjenljive od mjesta do mjesta.

Jednadžba kontinuiteta stacionarnog strujanja povezuje presjek A, brzinu v i gustoću ϱ

$$q_m = A\,v\,\varrho = \text{const.}$$

Pretvorba energije pri strujanju

Ako u prvom glavnom zakonu termodinamike (v. str. 190) uzmemo u obzir i promjenu kinetičke energije $W_k \Rightarrow \Delta E_k$, vrijedi

$$\delta\Phi - \delta W_{teh} = dH + dE_k$$

gdje je: Φ dovedeni ili odvedeni toplinski tok, W_{teh} dobiveni ili utrošeni tehnički rad, H entalpija.

Pri procesima strujanja, gdje ne dobivamo niti trošimo rad ($\delta W_{teh} = 0$), vrijedi $\delta\Phi - dH = dE_k$, a pri izentropskom procesu ($\delta\Phi = 0$) još i $-dH = dE_k$, odnosno izraženo specifičnom entalpijom h i brzinama v

$$-dh = v\,dv \qquad h_1 - h_2 = (v_2^2 - v_1^2)/2.$$

Bernoullijeva jednadžba za plinove i pare vrijedi za male razlike tlakova $\Delta p = p_1 - p_2$, u kojoj možemo računati sa zanemarljivo malom promjenom gustoće, tj. srednjom gustoćom $\varrho_{med} \approx$ const (sličnost s nestlačivim fluidom)

$$p_1 + \varrho_{med}\,(v_1^2/2) = p_2 + \varrho_{med}\,(v_2^2/2).$$

Brzina istjecanja

Teorijska je brzina istjecanja v_0 (bez trenja) (za $v_1 = 0$ i $v_2 = v_0$):

a) pri svim razlikama tlakova: $v_0 = \sqrt{2\,(h_1 - h_2)}$

b) pri malim razlikama tlakova ($\varrho \approx$ const): $v_0 = \sqrt{2\,(p_1 - p_2)/\varrho}$.

Stvarna brzina istjecanja v je zbog trenja o stijenke i čestica fluida među sobom nešto manja

$$v = \varphi\,v_0$$

gdje je φ faktor brzine (= 0,95 ... 0,98 u dobro zaobljenih sapnica).

Korisnost pri istjecanju s faktorom φ je $\eta = \varphi^2$.

Maseni protok $q_m = \alpha\,A_0\,v_0\,\varrho$ iznosi:

a) pri svim razlikama tlakova: $q_m = \alpha\,A_0\,\varrho\,\sqrt{2\,(h_1 - h_2)}$

b) pri malim razlikama tlakova ($\varrho \approx$ const): $q_m = \alpha\,A_0\,\sqrt{2\,\varrho\,(p_1 - p_2)}$.

A_0 je čisti presjek otvora sapnice, α je produkt faktora smanjenja presjeka (kontrakcije) mlaza μ i faktora brzine φ.

Istjecanje iz sapnica

Brzina istjecanja v_0 se povećava ako se povećava razlika tlakova $p_1 - p_2$ i postiže najveću vrijednost v_z (»Lavalova brzina«) pri kritičnom omjeru tlakova

$$p_z/p_1 = [2/(\varkappa + 1)]^{\varkappa/(\varkappa-1)}.$$

Taj kritični omjer tlakova ovisi samo o fluidu ($\varkappa$) i iznosi za različite fluide:

	$\varkappa$	p_z/p_1
dvoatomni plinovi	1,40	0,530
pregrijana vodena para	1,30	0,546
zasićena vodena para	1,135	0,577

Pri kritičnom omjeru tlakova p_z/p_1 postignuta brzina v_z jednaka je brzini zvuka i najveća je brzina koja se može pojaviti u najužem presjeku sapnice

$$v_z = \sqrt{\varkappa\, p_z/\varrho_z}\,.$$

S pomoću jednadžbe stanja plina možemo pisati još i

$$\varrho_z/\varrho_1 = [2/(\varkappa + 1)]^{1/(\varkappa-1)} \qquad T_z/T_1 = 2/(\varkappa + 1)$$

$$v_z = \sqrt{2[\varkappa/(\varkappa + 1)] \cdot (p_1/\varrho_1)} = \sqrt{2[\varkappa/(\varkappa + 1)]\, RT_1}$$

gdje su temperatura, tlak i gustoća ispred sapnice T_1, p_1, ϱ_1, a u najužem presjeku sapnice T_z, p_z, ϱ_z.

Najveći maseni protok $q_{m,\,max}$ koji protječe najužim presjekom A_{min} pri kritičnom omjeru tlakova p_z/p_1 iznosi

$$q_{m,\,max} = \alpha\, A_{min} \sqrt{p_1 \varrho_1 \varkappa [2/(\varkappa + 1)]^{(\varkappa + 1)/(\varkappa - 1)}}$$

gdje je α faktor istjecanja i iznosi

pri dobro izvedenim sapnicama	$\alpha = 0{,}95 \dots 0{,}98$
pri oštrim rubovima	$\alpha = 0{,}64 \dots 0{,}65.$

Proširena sapnica (De Laval). Stanje u najužem presjeku je određeno kritičnim omjerom tlakova p_z/p_1 i Lavalovom brzinom $v_z = \sqrt{2\,(h_1 - h_z)}$, a u konačnom presjeku tlakom p_2 i brzinom $v_2 = \sqrt{2\,(h_1 - h_2)}$.

Prigušivanje

Prigušivanje je nepovrativa promjena stanja pri kojoj se zbroj energije ne mijenja

$$h_1 + v_1^2/2 = h_2 + v_2^2/2.$$

Ako je brzina strujanja malena te je možemo zanemariti (pri običnom strujanju u cijevima, armaturama, stapnim strojevima itd.), možemo pisati $h_1 = h_2$. U (idealnim) plinovima je tada $T_1 = T_2$, a u para $T_1 \neq T_2$ (str. 230).

IZGARANJE

Izgaranje je egzotermni proces oksidacije goriva pri kojem se razvija ogrjevna toplina H_g.

Goriva su većinom organski spojevi sastavljeni uglavnom od ugljika (C), vodika (H), sumpora (S), kisika (O), dušika (N) te pepela (p) i vlage (v).

Sastav goriva s obzirom na jedinicu količine ili mase:

– za kruta i kapljevita goriva s obzirom na jedinicu mase

$$C' + H' + S' + O' + N' + p' + v' = 1 \text{ kg/kg}$$

– za plinovita goriva obično s obzirom na jedinicu količine odnosno obujma

$H_2' + CO' + CO_2' + O_2' + N_2' + CH_4' + C_2H_4' + H_2O' = 1$ (m^3/m^3 ili m^3 po m^3 goriva).

Procesi izgaranja osnovnih sastavina krutih i kapljevitih goriva:

ugljika	– potpuno izgaranje	$C + O_2 = CO_2$
	– nepotpuno izgaranje	$2\,C + O_2 = 2\,CO$
vodika		$2\,H_2 + O_2 = 2\,H_2O$
sumpora		$S + O_2 = SO_2$

Potreba kisika i zraka

a) U krutih i kapljevitih goriva je najmanja potrebna količina kisika

$O_{min} = C'/12 \cdot \sigma$ kmol/kg (kmol kisika po kg goriva)

σ = »karakteristika goriva«: $\sigma = 1 + 3\,[H' - (O' - S')/8]/C'$.

U krutih je goriva $0 < \sigma < 1{,}2$ (u čistog ugljika: $\sigma = 1$; u ugljena: $\sigma = 1{,}1 \dots 1{,}2$); u kapljevitih goriva je $\sigma > 1{,}2$ (u teških: $\sigma = 1{,}2 \dots 1{,}3$; u lakih $\sigma < 1{,}6$).

b) U plinovitih goriva je najmanja potrebna količina kisika

$O_{min} = H_2'/2 + CO'/2 + 2\,CH_4' + 3\,C_2H_4' - O_2'$ kmol/kmol (kmol kisika po kmol goriva).

Najmanja količina zraka: $Z_{min} = O_{min}/0{,}21$

Stvarna količina zraka: $Z_{min} = \lambda\, Z_{min}$

gdje je »faktor pretička zraka λ« za:

ručna ložišta	$\lambda = 1{,}6 \dots 2{,}0$
mehanička ložišta	$\lambda = 1{,}3 \dots 1{,}6$
ložišta na ulje i ugljenu prašinu	$\lambda = 1{,}2 \dots 1{,}4$
plinska ložišta	$\lambda = 1{,}05 \dots 1{,}2.$

Količina dimnih plinova

a) U krutih i kapljevitih je goriva količina dimnih plinova kmol/kg (kmol dimnih plinova po kg goriva)

$$D = \lambda/0{,}21 \cdot C'/12 \cdot \sigma + (H'/4 + O'/32 + N'/28 + v'/18).$$

b) U plinovitih goriva je količina dimnih plinova kmol/kmol (kmol dimnih plinova po kmol goriva)

$$D = \lambda/0{,}21 \cdot O_{min} + (H_2'/2 + CO'/2 + CO_2' + N_2' + CH_4' + C_2H_4' + O_2').$$

Ogrjevne vrijednosti

a) *Gornja ogrjevna vrijednost* H_g goriva predstavlja razliku entalpija između mješavina zraka i goriva te dimnih plinova, u kojima vlaga, (i pare sumporne kiseline, ukoliko gorivo sadrži sumpor), nakon ohlađivanja na temperaturu t = 0 °C postoji u kapljevitom agregatnom stanju.

b) *Donja ogrjevna vrijednost* H_i goriva označuje razliku entalpije mješavine zraka i goriva i dimnih plinova u kojima vlaga nakon ohlađivanja na temperaturu t= 0 °C, egzistira u parovitom agregatnom stanju.

Ogrjevna vrijednost (kalorična vrijednost) predočuje se u:

za kruta i kapljevita goriva: kJ/kg

za plinovita goriva: kJ/kmol (0 °C; 1,01325 bar).

Donja je ogrjevna vrijednost manja od gornje za toplinu isparivanja r vode (pri 0 °C):

r = 45 000 kJ/kmol = 2 500 kJ/kg = 2 000 kJ/m³ (0 °C; 1,013 25 bar).

Donje ogrjevne vrijednosti sastavina goriva

Sastavina goriva		kJ/kmol	kJ/kg	0 °C, 1,012 25 bar kJ/m³
ugljik (C) potpuno izgaranje		406 900	33 910	–
nepotpuno izgaranje		124 000	10 330	–
sumpor (S)		296 600	9 260	–
vodik	H_s	286 700	142 200	12 800
	H_i	241 700	119 900	10 790
benzen C_6H_6 (benzol)	H_s	3 273 900	41 900	–
	H_i	3 138 900	40 200	–
naftalen $C_{10}H_8$ (naftalin)	H_s	5 160 500	40 300	–
	H_i	4 980 500	38 900	–
etanol C_2H_5OH (alkohol)	H_s	1 365 100	29 600	–
	H_i	1 230 100	26 700	–
ugljični monoksid CO		282 900	–	12 600
metan CH_4	H_s	889 100	–	39 700
	H_i	799 100	–	35 700
eten C_2H_4 (etilen)	H_s	1 449 200	–	64 700
	H_i	1 359 200	–	60 700
etin C_2H_2 (acetilen)	H_s	1 302 300	–	58 100
	H_i	1 257 300	–	56 100

Donja ogrjevna vrijednost fizikalnih smjesa gorivih spojeva (plinovitih goriva) u (kJ/m³)

$$H_i = 12\,600\,CO' + 10\,800\,H_2' + 35\,700\,CH_4' + 60\,700\,C_2H_4' - 2\,000\,H_2O'.$$

Donja ogrjevna vrijednost složenih spojeva (npr. ugljena) može se točno odrediti samo pokusom. Za kruta i kapljevita goriva služi približna formula u (kJ/kg)

$$H_i = 34\,000\,C' + 101\,700\,H' + 6\,300\,N' + 19\,100\,S' - 9\,800\,O' - 2\,500\,v'.$$

Sastav dimnih plinova

Sastav je dimnih plinova pri potpunom izgaranju s obzirom na količinsku jedinicu kilomola

$$CO_2'' + H_2O'' + N_2'' + O_2'' = 1 \text{ kmol/kmol}.$$

Udjeli pojedinih sastavina (kmol/kmol):

- kruta i kapljevita goriva

$$CO_2'' = C'/12 : D$$
$$H_2O'' = (H'/2 + v'/18) : D$$
$$N_2'' = (N'/28 + 79/21 \cdot \lambda\, O_{min}) : D$$
$$O_2'' = (\lambda - 1)\, O_{min} : D$$

- plinovita goriva

$$CO_2'' = (CO' + CO_2' + CH_4' + 2\,C_2H_4') : D$$
$$H_2O'' = (H_2' + 2\,CH_4' + 2\,C_2H_4') : D$$
$$N_2'' = (N_2' + 79/21 \cdot \lambda\, O_{min}) : D$$
$$O_2'' = (\lambda - 1)\, O_{min} : D$$

Pri nepotpunom izgaranju sadrže dimni plinovi još: CO, CH_4 itd. Njihov sastav određujemo kemijskom analizom (npr. Orsatovim aparatom).

Entalpija dimnih plinova

Molarna se entalpija dimnih plinova H_{mD} kJ/kmol pri raznim temperaturama može proračunati uz poznavanje sastava dimnih plinova i molarne entalpije njihovih sastavina pri tim temperaturama (v. str. 194):

$$H_{mD} = CO_2'' \cdot H_{m\,CO_2} + H_2O'' \cdot H_{m\,H_2O} + N_2'' \cdot H_{m\,N_2} + O_2'' \cdot H_{m\,O_2}.$$

*

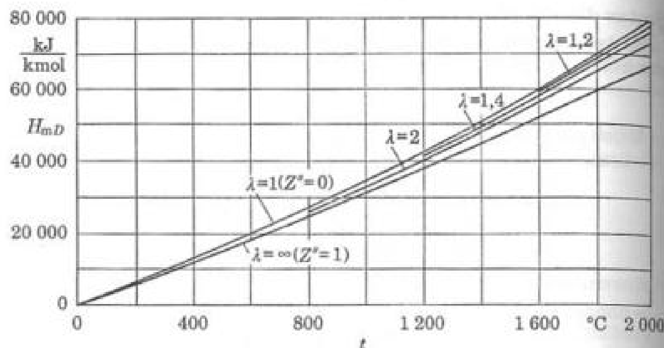
Molarnu entalpiju dimnih plinova za tehnička goriva možemo odrediti također pomoću Rosin-Fehlingova H_{mD}, T- dijagrama (v. str. 205), koji uzima u obzir i disocijaciju iznad 1 500 °C. Iz tog dijagrama možemo za svaku izabranu temperaturu odrediti molarnu entalpiju H_{mD1} za λ = 1 i molarnu entalpiju $H_{mD\infty}$ pri $\lambda = \infty$ (čisti zrak).

Iz minimalne potrebne količine zraka Z_{min}, količine dimnih plinova D i poznatog faktora pretička zraka λ izračunavamo relativni udio zraka u dimnim plinovima Z''

$$Z'' = (\lambda - 1)\, Z_{min} : D.$$

Otuda proizlazi molarna entalpija dimnih plinova kJ/kmol

$$H_{mD} = H_{mD1} - Z''\,(H_{mD1} - H_{mD\infty}).$$



Rosin-Fehlingov dijagram

Adijabatska temperatura izgaranja

Molarnu entalpiju dimnih plinova H_{mD} određujemo iz donje ogrjevne vrijednosti goriva H_i, specifične entalpije goriva h_g i molarne entalpije zraka H_{mZ} prije izgaranja te količine zraka Z i dimnih plinova D

$$H_{mD} = (H_i + h_g + Z\,H_{mZ})/D.$$

Veličine H_i, h_g, Z i D odnose se u krutih i kapljevitih goriva na jedinicu mase 1 kg goriva, a u plinovitih goriva na jedinicu količine tvari 1 kmol goriva.

Iz dobivene molarne entalpije H_{mD} dimnih plinova određuje se za odgovarajući faktor pretička zraka λ adijabatska temperatura izgaranja t pomoću Rosin-Fehlingova H_{mD}, t-dijagrama. Stvarna temperatura izgaranja je niža zbog odvođenja topline.

Kontrola izgaranja

1. Ni pepeo, ni dimni plinovi ne smiju sadržavati gorivih ostataka (neizgorjelog goriva, čađe, CO, CH_4 itd.).

2. Pretičak zraka λ (> 1) mora biti što manji, ali ipak toliki da se osigura potpuno izgaranje. Pretičak zraka kontroliramo sadržajem CO_2'' u dimnim plinovima. Što je veći faktor pretička zraka λ, to je manji udio CO_2''. Za čvrsta i kapljevita goriva s karakteristikom σ pri potpunom izgaranju vrijedi

$$(CO_2'')_s = 1/[1 + \sigma\,(\lambda/0{,}21 - 1)]$$

gdje je $(CO_2'')_s$ molarni sadržaj CO_2 u suhim dimnim plinovima (bez H_2O).

Goriva

Prirodna goriva su: *kruta* – drvo, treset i ugljen; *kapljevita* – nafta (zemno ulje) i *plinovita* – zemni plin.

Umjetna goriva dobivaju se preradbom iz prirodnih goriva ili drugih tvari.

Generatorski plin dobiva se iz krutih goriva (drveta, ugljena ili koksa) *rasplinjavanjem*, tj nepotpunim izgaranjem u plinskim generatorima. (Dovođenjem zraka dobiva se »zračni plin«, a dodavanjem vodene pare »vodeni plin«. Smjesu obaju plinova nazivamo »miješanim plinom«.)

Retortni plin (rasvjetni i koksni plin) dobiva se iz prirodnih krutih goriva (ugljena, drveta) *suhom destilacijom*, tj. zagrijavanjem (900 ... 1 100 °C) u retortama bez pristupa zraka.

Pri suhoj destilaciji dobiva se još i kapljeviti proizvod katran.

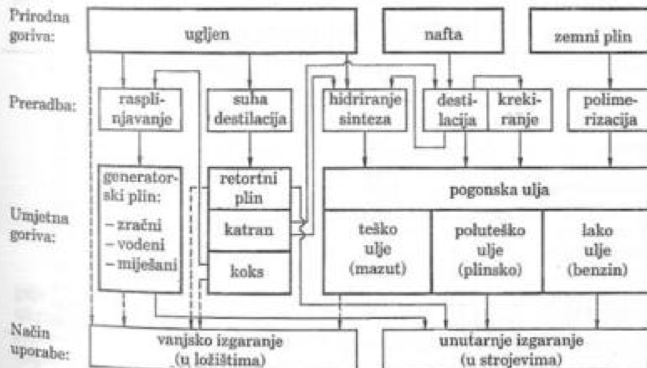
Koks i drveni ugljen su kruti ostatci pri suhoj destilaciji ugljena odnosno drveta. Kao gorivo su praktički čisti ugljik, a sadrže još i sav pepeo goriva, iz kojega su proizvedeni.

Pogonska ulja: laka (benzin, benzen), poluteška (plinsko ulje) i teška (loživo ulje, mazut) dobivaju se *frakcijskom destilacijom* nafte i katrana. Udio lakih goriva povećava se *krekiranjem* (cijepanjem velikih molekula).

Laka pogonska ulje dobivaju se još i *hidriranjem* (spajanjem s vodikom) i *sintezom* (rasplinjavanjem i združivanjem molekula H_2, CO itd.) iz ugljena, katrana ili ostataka nafte, odnosno *polimerizacijom* (spajanjem malih molekula u veće) iz zemnog plina (sintetski benzin).

Etanol C_2H_5OH (etilalkohol, žesta, špirit) dobiva se alkoholnim vrenjem iz škroba.

Etin C_2H_2 (acetilen) razvija se djelovanjem vode na kalcijev karbid CaC_2.



Glavne metode preradbe prirodnih goriva u umjetna i načina njihove uporabe

Kruta goriva

Gorivo	Sastav % (u 1 kg) čista tvar [1] C	H	S	O	N	pepeo	vlaga	Donja ogrjevna vrijednost $\frac{H_i}{kJ/kg}$
drvo, prosušeno	50	6	0	43,9	0,1	< 0,5	10 ... 20	14 700 ... 16 700
smeđi ugljen	70	7	2,0	20	1,0	2 ... 10	12 ... 60	8 400 ... 20 100
kameni ugljen	85	5	1,0	8	1,0	3 ... 12	0 ... 10	27 200 ... 34 100
koks	97	0,5	0,8	0,7	1,0	8 ... 10	1 ... 7	27 800 ... 30 300

Kapljevita goriva

Gorivo	Sastav % (u 1 kg) C	H	Gustoća $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Vrelište $\frac{t_v}{°C}$	Donja ogrjevna vrijednost $\frac{H_i}{kJ/kg}$
benzin	85	15	720	< 120	42 700
plinsko ulje	86	11	875	< 350	41 900
loživo ulje	87	11	940	> 350	41 200
naftalen $C_{10}H_8$ [2] (naftalin)	93,7	6,3	977	218	38 850
benzen C_6H_6 (benzol)	92,2	7,8	884	80,5	40 270
etanol C_2H_5OH (alkohol)	52	13	794	78,3	26 750

Plinovita goriva

Gorivo	Sastav % (u 1 m³) H_2	CO	CH_4	C_2H_4	CO_2	N_2	Gustoća $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Donja ogr. vrijednost 0 °C, 1,013 25 bar $\frac{H_i}{kg/m^3}$
vodik	H_2						0,089 87	10 790
uglj. monoksid	CO						1,250	12 620
metan	CH_4						0,716 8	36 080
etan	C_2H_6						1,356	63 500
propan	C_3H_8						2,019	92 970
butan	C_4H_{10}						2,668	121 800
eten (etilen)	C_2H_4						1,260	60 570
etin (acetilen)	C_2H_2						1,171	56 340
koksni plin	50	8	29	4	2	7	0,53	19 300
rasvjetni plin	51	8	32	4	2	3	0,50	20 500
vodeni plin	49	42	0,5	–	5	3	0,71	10 800
miješani plin	12	28	3	0,2	3	54	1,12	6 000
zračni plin	6	23	3	0,2	5	62	1,19	4 800
grotleni plin	4	28	–	–	8	60	1,25	4 000

[1] Srednje vrijednosti.

[2] Talište 80 °C.

PRIJENOS TOPLINE

Toplinsko provođenje

Toplinski tok Φ (tj. provođenje topline Q u vremenu t) kroz tvar je po iskustvenim zakonima upravo razmjeran temperaturnoj razlici $\Delta T = T_1 - T_2$ i površini A, a obratno razmjeran debljini ravne stijenke δ

$$\Phi = \frac{Q}{t} = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2) A,$$

gdje je: λ je koeficijent toplinske vodljivosti, iskazan jedinicom W/(m K).

Toplinska se vodljivost mijenja s temperaturom, a kod plinova i para još i s tlakom. Brojčane vrijednosti λ za različite tvari predočene su u tablicama na str. 245 ... 250.

Prijelaz topline

Toplinski tok Φ koji prelazi s kapljevite tvari na krutu stijenku, ili obratno, po iskustvu je upravno razmjeran temperaturnoj razlici $\Delta T = T_1 - T_2$ i površini A

$$\Phi = \frac{Q}{t} = \alpha (T_1 - T_2) A,$$

gdje je: α je koeficijent prijelaza topline izražen jedinicom W/(m² K).

Prijelaz topline na složen način ovisi o vrsti, temperaturi, tlaku i brzini plina, pare ili kapljevine, koji toplinu predaju krutoj stijenki ili je od nje primaju. Nadalje, prijelaz topline ovisi o obliku i kakvoći površine stijenke. Unatoč veoma opsežnom istraživačkom radu, toplinski je prijelaz općenito još i danas sasvim iskustvena vrijednost koja se može izračunati samo u nekim posebno jednostavnim slučajevima. *Nusseltova teorija sličnosti* omogućila je određivanje prijelaza topline pomoću značajki sličnosti (bezdimenzijskih brojeva):

Reynoldsova značajka $$Re = \frac{v\, l}{\nu}$$

Prandtlova značajka $$Pr = \frac{\varrho\, c_p\, \nu}{\lambda}$$

Pécletova značajka $$Pe = \frac{v\, l\, \varrho\, c_p}{\lambda} = Re \cdot Pr$$

Grashofova značajka $$Gr = \frac{l^3 g\, (T_1 - T_2)\, \alpha_V}{\nu^2}$$

Nusseltova značajka $$Nu = \frac{\alpha\, l}{\lambda}$$

gdje su: l mjerodavna duljina (m), v mjerodavna brzina (m/s), g težno ubrzanje (=9,81 m/s²), $T_1 - T_2$ mjerodavna temperaturna razlika (K), α_V koeficijent toplinskog širenja (K⁻¹), ϱ gustoća kg/m³, c_p specifični toplinski kapacitet (J/(kg K)), λ toplinska provodnost (W/(m K)), α koeficijent prijelaza topline (W/(m² K)), ν kinematička viskoznost (m²/s).

Ako cijev nije okrugla, treba za d uvrstiti odgovarajući hidraulični promjer $d' = 4\ A/O$ (A – površina, O – opseg). Za pravokutni je presjek cijevi $d' = 2\ a\ b/(a + b)$.

Vrijednosti za α_V predočene su na str. 189, a vrijednosti za ϱ, c, λ i ν kapljevina i plinova na str. 245 ... 247.

*

Najjednostavniji primjeri proračuna prijelaza topline pomoću Nusseltove značajke $Nu = \alpha\ d/\lambda$:

a) Slobodno strujanje plinova i kapljevina

Prijelaz topline s vodoravne cijevi promjera d na miran zrak ili viskoznu kapljevinu vodljivosti λ

na zrak $\quad \alpha\ d/\lambda = 0{,}37 \cdot Gr^{0,25}$

na kapljevinu $\quad \alpha\ d/\lambda = 0{,}40 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}$.

b) Prisilno strujanje plinova

Strujanje duž ravne ploče duljine l

pri $v > 5$ m/s $\quad$ vrijedi $\alpha\ l/\lambda = 0{,}075 \cdot Pe^{0,75}$.

Strujanje okomito na os cijevi za:

osamljenu cijev $\quad \alpha\ d/\lambda = 0{,}092 \cdot Pe^{0,75}$

snop cijevi $\quad \alpha\ d/\lambda = \zeta \cdot 0{,}075 \cdot Pe^{0,75}$

gdje za cijevi u poretku šahovskog polja, koje su jedna iza druge, vrijedi:

broj redova cijevi	2	4	6	8	10
vrijednost za ζ	1,00	1,23	1,36	1,43	1,47.

Brzinu v treba uzeti na najužem mjestu između dviju cijevi!

Strujanje kroz ravnu cijev $\quad \alpha d/\lambda = 0{,}040 \cdot Pe^{0,75}$.

c) Prisilno strujanje kapljevina

Laminarno strujanje (koje se javlja u kapljevina u cijevima ako je $Re < 2\ 300$) kroz duge ravne cijevi

$$\alpha\ d/\lambda \approx 3{,}65.$$

Turbulentno strujanje

$$\alpha\ d/\lambda = 0{,}039\ 6\ Pr \cdot Re^{0,75}/[1 + 0{,}35\ (Pr - 1)].$$

Koeficijent je prijelaza topline α za:

plinove $\quad$ 14 ... 14 W/(m² K)

kapljevine $\quad$ 2 000 ... 4 000 W/(m² K).

Pri promjeni agregatnog stanja prijelaz topline ima općenito mnogo veće vrijednosti. Za vodu iznosi pri:

vrenju $\quad$ 3 000 ... 16 000 W/(m² K)

kondenzaciji – filmskoj $\quad$ 6 000 ... 12 000 W/(m² K)

– kapljičastoj $\quad$ 30 000 ... 46 000 W/(m² K).

Toplinska svojstva tvari

Toplinska svojstva plinova i para (pri tlaku 0,980 665 bar ≈ 1 bar)

Plin (para)	Temperatura t/°C	Gustoća ϱ/kg/m³	Specifični toplinski kapacitet c_p/kJ/(kg K)	Koeficijent toplinske vodljivosti λ/W/(m K)	Kinematička viskoznost ν/mm²/s
zrak	– 50	1,534	1,004	0,020 5	9,65
	– 20	1,365	1,004	0,022 6	12,0
	0	1,252	1,009	0,023 7	13,9
	20	1,164	1,013	0,025 1	15,7
	40	1,092	1,013	0,026 5	17,6
	60	1,025	1,017	0,027 9	19,4
	80	0,968	1,021	0,029 3	21,5
	100	0,916	1,021	0,030 7	23,6
	120	0,870	1,026	0,032 0	25,9
	160	0,789	1,030	0,034 4	30,6
	200	0,723	1,034	0,037 0	35,5
	250	0,653	1,042	0,040 0	42,2
	300	0,596	1,047	0,042 9	49,2
	400	0,508	1,059	0,048 5	64,6
	600	0,391	1,088	0,058 1	98,8
	800	0,318	1,113	0,066 9	137
	1 000	0,268	1,139	0,076 1	181
	1 200	0,232	1,164	0,084 5	227
	1 400	0,204	1,189	0,093 0	278
	1 600	0,182	1,218	0,101 2	332
vodik H_2	– 50	0,106 4	–	0,147	69,1
	0	0,086 9	14,232	0,176	97,1
	50	0,073 4	14,358	0,202	128
	100	0,063 6	14,442	0,229	162
	200	0,050 2	14,525	0,276	240
ugljični dioksid CO_2	– 50	2,373	–	0,010 9	4,76
	0	1,912	0,828	0,014 3	7,23
	50	1,616	0,875	0,017 8	10,0
	100	1,400	0,925	0,021 3	13,2
sumporni dioksid SO_2	0	2,83	0,624	0,008 4	4,09
	50	–	0,649	–	–
	100	–	0,674	–	–
	200	–	0,720	–	–
amonijak NH_3	0	0,746	2,168	0,022 0	12,5
	50	0,626	2,198	–	17,7
	100	0,540	2,231	0,030 0	24,2
	200	0,425	2,394	–	39,0

Toplinska svojstva pregrijane vodene pare

Tlak $\frac{p}{\text{bar}}$	Temperatura $\frac{t}{°C}$	Gustoća $\frac{\varrho}{\text{kg/m}^3}$	Specifični toplinski kapacitet $\frac{c_p}{\text{kJ/(kg K)}}$	Koeficijent toplinske vodljivosti $\frac{\lambda}{\text{W/(m K)}}$	Kinematička viskoznost $\frac{\nu}{\text{mm}^2/\text{s}}$
1	100	0,598	2,032	0,023 7	21,4
	120	0,557	1,999	0,025 1	23,9
	140	0,529	1,981	0,026 5	26,5
	160	0,504	1,973	0,028 0	29,4
	180	0,481	1,964	0,029 4	32,2
	200	0,460	1,964	0,030 9	35,3
2	140	1,070	2,050	0,027 7	13,4
	160	1,016	2,024	0,029 0	14,8
	180	0,968	2,007	0,030 2	16,2
	200	0,926	1,999	0,031 6	17,8
	220	0,887	1,998	0,033 0	19,3
	240	0,851	1,998	0,034 5	21,3
4	160	2,067	2,149	0,030 9	7,43
	180	1,963	2,106	0,031 8	8,13
	200	1,872	2,075	0,033 1	8,93
	220	1,789	2,058	0,034 3	9,70
	240	1,715	2,045	0,035 6	10,7
	260	1,647	2,041	0,037 0	11,5
	280	1,585	2,041	0,038 4	12,5
6	160	3,160	2,315	0,033 0	4,98
	180	2,989	2,226	0,033 7	5,48
	200	2,841	2,162	0,034 5	6,02
	220	2,710	2,123	0,035 6	6,58
	240	2,593	2,101	0,036 7	7,15
	260	2,487	2,088	0,038 0	7,72
	280	2,391	2,078	0,039 4	8,38
8	180	4,047	2,364	0,036 2	4,14
	200	3,834	2,265	0,036 8	4,58
	220	3,650	2,199	0,037 5	5,01
	240	3,486	2,161	0,038 5	5,44
	260	3,339	2,135	0,039 6	5,89
	280	3,206	2,118	0,040 8	6,35
	300	3,085	2,110	0,042 2	6,84
	320	2,974	2,105	0,043 7	7,33
10	180	5,144	2,569	0,040 9	3,43
	200	4,857	2,371	0,040 2	3,78
	220	4,610	2,268	0,040 3	4,13
	240	4,394	2,216	0,041 0	4,48
	260	4,203	2,186	0,042 0	4,88
	280	4,032	2,164	0,043 1	5,26
	300	3,876	2,156	0,044 6	5,65
	320	3,734	2,147	0,046 0	6,03

Toplinska svojstva kapljevina

Kapljevina	Temperatura $\frac{t}{°C}$	Gustoća $\frac{\varrho}{\text{kg/m}^3}$	Specifični toplinski kapacitet $\frac{c_p}{\text{kJ/(kg K)}}$	Koeficijent toplinske vodljivosti $\frac{\lambda}{\text{W/(m K)}}$	Kinematička viskoznost $\frac{\nu}{\text{mm}^2/\text{s}}$
voda	0	1 000	4,219	0,555	1,79
	20	998	4,182	0,598	1,01
	40	992	4,178	0,627	0,658
	60	983	4,190	0,651	0,478
	80	972	4,199	0,669	0,364
	100	958	4,215	0,681	0,295
	120	944	4,232	0,685	0,249
	140	926	4,257	0,684	0,217
	160	908	4,282	0,680	0,189
	180	887	4,395	0,673	0,172
	200	863	4,500	0,665	0,162
	250	794	4,855	0,644	0,137
	300	700	5,693	0,564	0,131
mazivo ulje	20	871	1,850	0,144	15,0
	40	858	1,934	0,143	7,93
	60	845	2,018	0,142	4,94
	80	832	2,101	0,141	3,40
	100	820	2,185	0,140	2,44
	120	807	2,269	0,138	1,91
transformatorsko ulje	20	866	1,892	0,124	36,5
	40	852	1,993	0,123	16,7
	60	842	2,093	0,122	8,69
	80	830	2,198	0,120	5,20
	100	818	2,294	0,119	3,79
ugljični dioksid CO_2	20	717	3,642	0,087	0,062 4
	30	596	–	0,071	0,054 3
sumporni dioksid SO_2	-20	1 485	–	0,223	0,321
	0	1 435	1,356	0,212	0,256
	20	1 383	1,390	0,199	0,220
amonijak NH_3	-20	665	4,562	0,585	0,383
	0	639	4,646	0,540	0,376
	20	610	4,772	0,494	0,360
monoklormetan CH_3Cl	-20	997	1,507	0,195	0,310
	0	960	1,570	0,179	0,304
	20	921	1,591	0,163	0,293
živa Hg	0	13 595	0,140	10,5	0,125
	20	13 546	0,139	9,3	0,115

Toplinska svojstva kovina i kovinskih slitina

Kovina	Temperatura $\frac{t}{°C}$	Gustoća $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Specifični toplinski kapacitet $\frac{c}{kJ/(kg\ K)}$	Koeficijent toplinske vodljivosti $\frac{\lambda}{W/(m\ K)}$
aluminij	20	2 700	0,896	229
bakar (čisti)	20	8 930	0,383	395
(trgovački)	20	8 300	0,419	372
bronca (aluminijska)	20	7 800	0,419	–
(kositrena)	20	8 750	0,352	55
cink	20	7 130	0,385	113
crveni lijev	20	8 600	0,377	60
čelik, 0,1 % C	0	7 850	0,465	59
	400	–	0,628	44
	600	–	–	37
0,2 % C	20	7 850	0,460	50
0,6 % C	20	7 840	0,460	47
13 % Cr	20	7 750	0,460	29
Cr-Ni	20	7 900	0,477	14
	500	–	0,607	21
18 Cr 8 Ni	20	7 880	0,502	20
36 % Ni	20	8 130	0,502	16
duralumin	20	2 700	0,912	165
	100	–	–	181
elektron	20	1 800	–	116
kositar (kalaj)	20	7 280	0,226	65
magnezij (čisti)	20	1 740	1,017	143
mjed (mesing)	20	≈ 8 600	0,381	≈ 93
monel	20	8 580	0,500	26
nikal (čisti)	20	8 800	0,446	58
novo srebro	20	–	0,393	24
olovo (čisto)	0	11 340	0,128	35
	100	–	0,134	34
platina	20	21 400	0,133	70
silumin	20	2 600	0,900	159
sivi lijev	20	≈ 7 250	0,540	≈ 58
srebro	20	10 500	0,234	417
volfram	20	19 300	0,134	–
zlato	20	19 250	0,129	310
željezo (čisto)	20	7 850	0,465	67

Toplinska svojstva anorganskih krutina

Tvar	Temperatura $\frac{t}{°C}$	Gustoća $\frac{\varrho}{kg/m^3}$	Specifični toplinski kapacitet $\frac{c}{kJ/(kg\ K)}$	Koeficijent toplinske vodljivosti $\frac{\lambda}{W/(m\ K)}$
azbestne ploče	20	2 000	–	0,7
azbestna vuna	20	300	–	0,09
	20	600	–	0,20
beton (suhi)	20	≈ 2 100	0,880	≈ 1,10
granit	20	2 900	0,750	2,9
kotlovac				
karbonatni	300	1 000 ... 2 500	–	0,15 ... 2,30
silikatni	300	300 ... 1 200	–	0,08 ... 0,23
sulfatni	300	2 000 ... 2 700	0,840	0,7 ... 2,30
kremen	50	≈ 400	0,840	≈ 0,08
kremeno staklo	20	2 210	0,710	1,36
led (H_2O)	0	917	1,930	2,2
	–50	924	–	2,8
mramor	20	≈ 2 600	0,800	2,8
opeka (suha)	20	≈ 1 700	0,840	≈ 0,46
pijesak (suhi)	20	1 520	–	0,33
pješčenjak	20	≈ 2 200	0,710	≈ 1,9
porculan	20	≈ 2 360	0,800	≈ 1,2
silikatna opeka (silika)	100	≈ 1 850	–	≈ 1,10
	1 000	–	–	≈ 1,60
snijeg	0	200	–	0,15
staklena vuna	20	50	0,670	0,036
	20	300	–	0,043
staklo	20	2 700	0,840	0,76
šamotna opeka	100	≈ 1 850	0,840	≈ 0,8
	1 000	–	1,130	≈ 1,0
tlo (ilovačasto)	20	1 450	0,880	1,28
vapnenac	20	2 650	0,840	2,2
vuna od troske	20	200	0,750	0,04
	20	500	–	0,06
zid od opeke	20	–	–	≈ 0,75
žbuka (zidna)	20	1 690	0,840	0,80

Toplinska svojstva organskih krutina

Tvar	Temperatura t / °C	Gustoća ϱ / kg/m³	Specifični toplinski kapacitet c / kJ/(kg K)	Koeficijent toplinske vodljivosti λ / W/(m K)
asfalt	20	2 120	0,920	0,74
bakelit	20	1 270	1,590	0,23
pamuk				
češljani	20	81	–	0,059
pleteni	–	245	1,300	0,077
tkani	–	330	–	0,070
celuloid	20	1 400	–	0,215
ebonit	20	1 190	1,420	0,16
guma	20	1 200	1,420	≈ 0,16
gumena spužva	20	224	–	0,055
koks	20	1 400	0,920	–
drvo (prosušeno)				
bor ⊥	20	≈ 550	2,790	0,14
=	–	–	–	0,28
bukva =	20	≈ 770	–	0,35
hrast ⊥	20	≈ 850	2,390	≈ 0,10
=	–	–	–	0,37
drveni ugljen	20	200	0,840	0,06
papir	20	1 000	1,340	0,14
pluto	20	200	1,380	0,05
ugljen	20	≈ 1 200	1,300	≈ 0,21
ugljena prašina	30	730	1,300	0,12
šećer	0	1 600	1,260	0,6
svila (tkana)	0	147	–	0,045
	50	–	1,260	0,055
	100	–	–	0,060
koža	20	1 000	1,510	≈ 0,16
vuna				
češljana	20	9	–	0,036
pletena	–	176	1,670	0,04
tkana	–	380	–	0,050
piljevina (sitna)	20	190	–	0,06

Toplinsko zračenje (isijavanje)

Zračenje topline jest odavanje energije elektromagnetnim valovima duljine 0,8 ... 300 µm (toplinske – infracrvene zrake).

Apsorpcijski faktor a jest omjer energije E_a koju tijelo apsorbira (upija) i sve energije E koja dospijeva na površinu tijela

$$a = E_a/E < 1$$

$E_a = E$ $\quad a = 1$ toplinski »crno« tijelo
$E_a = 0$ $\quad a = 0$ toplinski »bijelo« tijelo.

Stvarna tijela nisu ni toplinski »bijela« ni »crna«, već toplinski »siva«:

$$0 < E_a < E \qquad 0 < a < 1.$$

Emisijski faktor ε jest omjer energije E koju odaje površina tijela i energije E_c koju odaje površina crnog tijela pri istoj temperaturi:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_c} < 1.$$

Po Kirchhoffovu zakonu vrijedi (pri jednakoj temperaturi): $\varepsilon = a$.

Emisijski faktori tehnički važnih tvari predočeni su na str. 252.

Stefan-Boltzmannov zakon

Vlastita emisija E_c koju pri zračenju odašilje crno tijelo upravno je razmjerna površini A i 4. potenciji apsolutne temperature T

$$E_c = \sigma_0 T^4 A,$$

gdje je: $\quad \sigma_0 = 5{,}669\,61 \cdot 10^{-8}$ W/(m² K⁴).

U tehnici se ta jednadžba rabi u obliku

$$E_c = \sigma\,(T/100)^4 A,$$

gdje je: σ konstanta zračenja crnog tijela

$$\sigma = 5{,}67 \text{ W/(m}^2\text{ K}^4).$$

Za siva tijela vrijedi $\quad E_s = \varepsilon\,\sigma\,(T/100)^4 A,$

gdje je: ε emisijski faktor sivog tijela.

Izmjena topline zračenjem između dvaju tijela termodinamičkih temperatura T_1 i T_2 ($T_1 > T_2$) i emisijskih faktora ε_1 i ε_2

$$\Phi = \sigma' \left[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4\right] A$$

gdje je σ':

a) u veoma velikih, blizu smještenih, paralelnih i ravnih ploha ($A = A_1 = A_2$)

$$\sigma' = \sigma/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1).$$

b) ako drugo tijelo (2) potpuno okružuje prvo tijelo (1)

$$\sigma' = \sigma/[1/\varepsilon_1 + \omega\,(1/\varepsilon_2 - 1)] \qquad \omega = A_1/A_2.$$

Ako je ploha A_1 znatno manja od plohe A_2 ($\omega \approx 0$), vrijedi: $\sigma' = \varepsilon_1 \sigma$.

Emisijski faktor ε površinskog zračenja

Površina		Temperatura $\frac{t}{°C}$	Emisijski faktor ε
tvar	stanje		
Kovine:			
aluminij	oksidiran	25	0,07
	poliran	230	0,05
aluminij za bronziranje	namaz	100	0,30
bakar	tamno oksidiran	20	0,78
	oksidiran	130	0,76
	poliran	20	0,030
cink	oksidiran	20	0,25
	poliran	230	0,045
čelik	tamno zahrđao	20	0,85
	lijevana površina	100	0,80
	valjana površina	20	0,77
	crveno zahrđao	20	0,61
	brušen	20	0,24
	sjajan, jetkan	150	0,128
kositar	sjajan	20	0,07
krom	poliran	150	0,058
mjed	oksidirana	338	0,22
	polirana	300	0,05
nikal	poliran	100	0,045
olovo	oksidirano	20	0,28
	polirano	130	0,06
sivi lijev	tokaren	20	0,43
srebro	polirano	20	0,025
zlato	polirano	20	0,025
Nekovine:			
drvo	blanjano	20	0,90
krovna ljepenka		20	0,93
lak, emajl		20	0,90
lak za radijatore		100	0,925
led	gladak	0	0,966
mramor	poliran	20	0,93
opeka	gruba, crvena	20	0,93
papir		95	0,85
porculan		20	0,93
staklo		90	0,94
svilena tkanina		20	0,77
šamot		1 200	0,60

Prolaz topline

a) Prolaz topline kroz stijenke pri dovođenju toplinskog toka dodirom

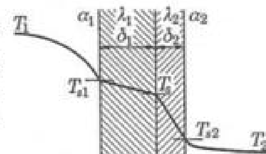
Toplinski tok koji prelazi s neke tekućine (temperature T_1 i koeficijenta prijelaza topline α_1) na stijenku, kroz tu stijenku (debljine δ i koeficijenta toplinske vodljivosti λ) te sa stijenke na drugu tekućinu (temperature T_2 i koeficijenta prijelaza topline α_2) iznosi za površinu stijenke A

$$\Phi = Q/t = k(T_1 - T_2)\,A,$$

gdje je k koeficijent prolaza topline koji se dobiva iz jednadžbe

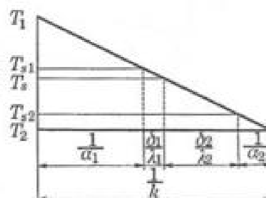
$$1/k = 1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2.$$

Koeficijent prolaza topline k iskazuje se istim jedinicama kao i koeficijent prijelaza topline α, tj. u W/(m^2 K).



Za višeslojne stijenke (npr. za stijenke od dva sloja od kojih jedan ima debljinu δ_1 i koeficijent toplinske vodljivosti λ_1, a drugi debljinu δ_2 i koeficijent toplinske vodljivosti λ_2 koeficijent prolaza topline k računamo po jednadžbi

$$1/k = 1/\alpha_1 + \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + 1/\alpha_2.$$



Temperature na pojedinim mjestima stijenke možemo odrediti trokutastim dijagramom ili jednadžbama

$$T_{s1} = T_1 - k\,(1/\alpha_1)\,(T_1 - T_2)$$
$$T_s = T_1 - k\,(1/\alpha_1 + \delta_1/\lambda_1)\,(T_1 - T_2)$$
$$T_{s2} = T_1 - k\,(1/\alpha_1 + \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2)\cdot(T_1 - T_2)$$

b) *Prolaz topline kroz stijenku pri dovođenju toplinskog toka zračenjem i konvekcijom*

Toplinski tok, koji prelazi konvekcijom s neke prozirne tekućine (temperature T_1 i koeficijenta prijelaza α_1) na stijenku temperature T_{s1} i istodobno zračenjem na tu stijenku emisijskog faktora ε_s od neke druge stijenke (temperature T i emisijskog faktora ε), te se nadalje provodi kroz tu stijenku (debljine δ i vodljivosti λ) i s nje prelazi na drugu neprozirnu tekućinu (temperature T_2 i koeficijenta prijelaza α_2), iznosi

$$\Phi = k\,(T_1 - T_2)\,A.$$

Koeficijent k računamo iz jednadžbe

$$1/k = 1/(\alpha + \alpha_1) + \delta/\lambda + 1/\alpha_2,$$

gdje je

$$\alpha = \sigma'\,[(T/100)^4 - (T_{s1}/100)^4]/(T_1 - T_{s1}) = f_1(T_{s1}).$$

Vrijednost σ' izračunavamo iz poznatih koeficijenata ε i ε_s (v. str. 252), a temperaturu T_{s1} iz jednadžbe $\alpha T_{s1} = T_1 - [k/(\alpha + \alpha_1)]\,(T_1 - T_2) = f_2(\alpha)$.

Jednadžbe $\alpha = f_1(T_{s1})$ i $T_{s1} = f_2(\alpha)$ rješavamo iteracijski ili grafički.

Tehnički izmjenjivači topline

Toplinski tok Φ prelazi s tekućine početne temperature T_1' i konačne niže temperatura T_1'' na tekućinu početne temperature T_2' i konačne više temperature T_2''. Temperaturna razlika između obiju tekućina na svakom je mjestu izmjenjivača drukčija.

S obzirom na međusobni smjer strujanja obiju struja u izmjenjivaču, razlikujemo istosmjerno, protusmjerno i križno strujanje.

Istosmjerno strujanje

$\Delta T' = T_1' - T_2'$, $\Delta T'' = T_1'' - T_2''$

Protusmjerno strujanje

$\Delta T' = T_1' - T_2''$, $\Delta T'' = T_1'' - T_2'$

Toplinski tok u izmjenjivaču topline računamo srednjom temperaturnom razlikom ΔT_{med}

$$\Phi = k \cdot \Delta T_{med} \cdot A_0,$$

gdje su: k koeficijent prolaza topline (v. str. 253), A_0 površina izmjenjivača.

Srednja je (»logaritamska«) temperaturna razlika

$$\Delta T_{med} = (\Delta T' - \Delta T'')/\ln(\Delta T' / \Delta T'').$$

Srednja (logaritamska) temperaturna razlika ΔT_{med} pri protusmjernom strujanju veća je nego pri istosmjernom.

Pri protusmjernom strujanju može biti konačna temperatura tekućine koja toplinu prima (grijući se) viša od konačne temperature tekućine koja toplinu predaje (hladeći se). Pri istosmjernom je strujanju, međutim, konačna temperatura tekućine koja toplinu prima uvijek niža od konačne temperature tekućine koja toplinu predaje.

Zato u izmjenjivačima topline protusmjerno strujanje ima uvijek prednost pred istosmjernim. Križno se strujanje po svom efektu približuje protusmjernome.

TOPLINSKI UREĐAJI I STROJEVI

Znakovi

čista / sirova / nečista – voda	kemijska priprema vode	turbina
para / zrak / dimni plinovi	tlačnovodni reaktor	stapni pogonski stroj
gorivi plin / ulje / ugljen	parni kotao s pregrijačem	elektromotor
tekuća kovina / cjevovod (općenito) / uplivni, upravljački i signalni vod	isparivač (transformator pare)	gonjeni stroj (općenito)
ventil / redukcijski ventil	plinski generator	turbopumpa
opružni sigurnosni ventil	gorionik (za ulje)	stapna pumpa
otvorena posuda (općenito) / zatvorena posuda (općenito)	potrošač topline	turbo-kompresor ventilator
površinski izmjenjivač topline	ložište, plamenik (općenito)	stapni kompresor
površinski izmjenjivač topline	ispuh	transportni stroj
odvajač pare	površinski kondenzator	električni generator
odvajač prašine (ciklon)	površinski kondenzator (s povratnim hlađenjem)	mjerač
ejektor	rashladni toranj	regulator

PARNI KOTLOVI

Parni su kotlovi toplinski uređaji koji se sastoje od:

a) *uređaja za loženje*, tj. ložišta (prostora za izgaranje), u kojem se izgaranjem oslobađa kemijski vezana energija goriva da bi prešla na dimne plinove, i pomoćnih uređaja za loženje (rešetka, gorionik itd.),

b) *izmjenjivača topline* (parnog kotla u užem smislu), u kojem toplina prelazi s dimnih plinova na vodu odnosno paru.

Toplinski tok Φ koji s gorivom dolazi u ložište predočujemo potroškom goriva B (kg/s) i njegovom donjom ogrjevnom vrijednosti H_i

$$\Phi = B\, H_i.$$

Dovodimo li u ložište zagrijan zrak za izgaranje, dolazi s njime još i toplinski tok

$$\Phi_Z = B\, Z\, H_{mZ}$$

gdje su: Z količina zraka za izgaranje na jedinicu mase goriva (kmol/kg) (v. str. 237), H_{mZ} molarna entalpija zraka (kJ/kmol) (v. str. 194).

Ložišta su građena za:

– izgaranje u sloju, tj. rešetki (ravnom ručnom ili mehaničkom, stubastom i sl. za komadno gorivo)

– izgaranje u lebdenju, tj. u komori za izgaranje (za ugljenu prašinu, ulje ili plin).

Površinu rešetke R (m^2) određujemo na temelju »površinskog toplinskog opterećenja ložišta«

$$\Phi/R = B\, H_i/R$$

koji je za:	ravnu ručnu rešetku	600 ... 1 000 kW/m^2
	mehaničku rešetku	900 ... 1 600 kW/m^2
	stubastu rešetku	700 ... 800 kW/m^2.

Obujam ložišnog prostora V (m^3) ocjenjujemo na temelju »prostornog toplinskog opterećenja ložišta«

$$(\Phi + \Phi_Z)/V = B\,(H_i + Z\, H_{mZ})/V$$

koji je za:	mehaničku rešetku pri loženju	250 ... 400 kW/m^3
	ugljenom prašinom	170 ... 330 kW/m^3
	uljem	900 ... 2 500 kW/m^3
	plinom	1 600 ... 2 500 kW/m^3.

Pri izgaranju pod tlakom (ulja ili plina) obujamno toplinsko opterećenje ložišta dostiže i do 8 000 kW/m^3.

Presjek ložišta S_k (m^2) ocjenjujemo na temelju »površinskog toplinskog opterećenja presjeka ložišta«

$$(\Phi + \Phi_Z)/S_k = B\,(H_i + Z\, H_{mZ})/S_k$$

koji je za ložišta na ugljenu prašinu 2 300 ... 2 800 kW/m^2.

Izmjenjivač topline s dimnih plinova na vodu odnosno paru izveden je cijevnim sustavom.

Vodu odnosno paru zagrijavamo pri konstantnom tlaku p održavanim regulacijom loženja, pri čemu napojne pumpe napajaju kotao protokom vode q_m, kg/s.

S obzirom na različite uvjete prijenosa topline na vodu odnosno paru, razlikujemo sljedeće dijelove izmjenjivača topline:

a) *Zagrijač vode* (ekonomajzer) u kojem se napojna voda temperature T_v i specifične entalpije h_v zagrijava do temperature T_a, pri čemu joj naraste specifična entalpija na h_a. Da se voda ne bi isparivala već u zagrijaču, mora temperatura T_a biti niža od temperature zasićenja T_s (koja odgovara tlaku p u parnom kotlu), $T_a < T_s$. Zato je također $h_a < h'$. (Specifična entalpija h' određena je tlakom p.)

U zagrijaču vode dovodimo vodi toplinski tok Φ_a

$$\Phi_a = q_m\,(h_a - h_v).$$

b) *Isparivač* je namijenjen daljnjem zagrijavanju vode do temperature zasićenja T_s i njenom isparivanju. U isparivaču dobivamo mokru paru sadržaja pare $x = 0{,}95 \ldots 0{,}96$ i entalpije $h_b = h' + x\,(h'' - h')$. (Specifične entalpije h' i h'' određene su tlakom p.)

U isparivaču dovodimo vodi-pari toplinski tok Φ_b

$$\Phi_b = q_m\,(h_b - h_a).$$

c) *Pregrijač* pare služi za sušenje pare do potpunog sadržaja pare $x = 1$ (suho zasićena para) i njenom pregrijavanju do temperature pregrijanja T, pri čemu se pari povećava specifična entalpija na vrijednost h (koja je određena tlakom pare p i temperaturom T).

U pregrijaču dovodimo pari toplinski tok Φ_c

$$\Phi_c = q_m\,(h - h_b).$$

Suprotno načelu protustrujnog izmjenjivača topline dimni plinovi predaju toplinu najprije isparivaču (budući da voda koja se isparava dovoljno hladi cijevne stijenke pa ih možemo smjestiti u područje najviših temperatura), zatim pregrijaču (u kojemu pregrijana para-plin slabo hladi cijevne stijenke pa ih stoga ne možemo smjestiti u područje najviših temperatura) i konačno zagrijaču vode. U parnih kotlova koji rabe zagrijan zrak za izgaranje (ložišta na ugljenu prašinu, ulje i ili plin) smješten je na kraju puta dimnih plinova zagrijač zraka (koji vraća toplinski tok Φ_Z u ložište).

Zbog odvođenja toplinskih tokova iz dimnih plinova na isparivač i pregrijač pare te na zagrijač vode i zraka, dimni se plinovi postupno hlade.

Konačna temperatura dimnih plinova, osobito ako sadrže mnogo vlage, ne smije biti manja od 140 °C (jer bi se kondenzacijom vlage na hladnim cijevnim stijenkama stvarale kiseline koje bi ih najedale).

Proračun veličine ogrjevnih površina pojedinih dijelova izmjenjivača topline – v. na str. 254.

Kapacitet (snaga) parnog kotla određen je toplinskim tokom koji u svim dijelovima izmjenjivača topline dovodimo vodi-pari

$$\Phi_k = \Phi_a + \Phi_b + \Phi_c = q_m (h - h_v).$$

Osim toplinskog toka Φ_k rabi se za oznaku kapaciteta parnih kotlova također:

a) proizvodnja pare q_m (što nije točno jer uz istu proizvodnju pare q toplinski tok Φ_k ovisi još i o razlici entalpija $h - h_v$);

b) ogrjevna površina izmjenjivača A (što je netočno jer toplinski tok Φ_k uz inače jednake ogrjevne površine, ovisi i o koeficijentu prolaza topline k i o srednjoj temperaturnoj razlici ΔT (v. str. 254)).

Stupanj djelovanja (energijski) parnog kotla

Toplinski tok Φ_k, koji prelazi na vodu-paru bit će manji od toplinskog toka koji dolazi u ložište s gorivom ($\Phi_k < \Phi$), i to zbog gubitka u parnom kotlu (ložištu i izmjenjivaču topline), tj. zbog

neizgorjelih ostataka goriva u pepelu	do 5 %,
letećeg koksa i čađe	do 8 %,
neizgorjelih plinova CO, CH_4 itd.	do 1 %,
osjetne topline dimnih plinova	8 ... 11 %,
zračenja i prijelaza topline na okolicu	do 12 %.

Stupanj djelovanja parnog kotla η_k je omjer toplinskih tokova Φ_k i Φ

$$\eta_k = \Phi_k/\Phi = q_m(h - h_v)/B\,H_i$$

a iznosi za razne kotlove za:

– manje (s ravnom rešetkom)	$\eta_k = 0{,}72 \ldots 0{,}78$
– veće (s mehaničkom rešetkom)	$\eta_k = 0{,}77 \ldots 0{,}84$
– najveće (pri loženju ugljenom prašinom, uljem ili plinom)	$\eta_k = 0{,}83 \ldots 0{,}91$.



Krivulja ovisnosti korisnosti o opterećenju teče u širokom pojasu opterećenja vrlo položito. (Ovdje nisu uračunani dodatni gubitci zbog pogonskih prekida djelovanja kotla.)

Najveći stupanj djelovanja $\eta_{k\,max}$ postiže se pri najčešćem opterećenju, tj. pri 2/3 ... 3/4 nazivnog kapaciteta kotla.

Energija pare s obzirom na temperaturu okolice T_0 proizlazi – osim iz toplinskog toka Φ_k – još i iz toplinskog toka Φ_0 što ga je napojna voda primila prije ulaza u parni kotao iz drugih izvora koji su joj povećali specifičnu entalpiju od h_0 pri temperaturi T_0 na h_v pri temperaturi T_v

$$\Phi_0 = q_m (h_v - h_0).$$

Ukupna energija pare na izlazu iz kotla izražena je dakle toplinskim tokom

$$\Phi_0 + \Phi_k = q_m (h - h_0).$$

Napojne pumpe

Svaki parni kotao mora imati najmanje dva uređaja za napajanje koji dobivaju pogonsku energiju iz međusobno nezavisnih izvora (npr. elektromotor i parni stroj, benzinski ili dizelski motor i sl.).

Za napajanje služe ponajviše stapne pumpe i turbopumpe.

Kapacitet napojnih pumpi odabire se tako da bi pri kvaru na najvećoj pumpi sve preostale dobavljale protočnu masu q_{mp} koja je veća od najveće protočne mase q_m vode-pare kroz parni kotao, i to:

$q_{mp} = 1{,}6\, q_m$	– ako je parni kotao bez automatske regulacije, a protočna masa je $q_m \leq 30$ t/h
$q_{mp} = 1{,}25\, q_m$	– ako parni kotao ima automatsku regulaciju, a protočna masa je $q_m > 30$ t/h ili je pogon neposredno s glavnog parnog stroja.

Potrebna snaga za pogon napojnih pumpi iznosi:

teorijska $$P_0 = q_{mp}\left[\frac{(p - p_n) + \Delta p}{\varrho} + g\,h_g\right]$$

efektivna $$P = \frac{P_0}{\eta_p}$$

gdje su: p tlak u kotlu, p_n tlak u napojnom spremniku, Δp protočni gubitci, ϱ gustoća vode pri temperaturi napajanja T_v, h_g geodetska visina razine vode u kotlu nad razinom u napojnom spremniku, $g = 9{,}81$ m/s^2, η_p stupanj djelovanja (iskoristivost) pumpe.

Protočne gubitke Δp ocjenjujemo sa:

0,5 ... 1 bar	za zagrijač vode (ekonomajzer)
2,5 bar	za napojni regulator
2 ... 3 bar	za otpore u cjevovodima.

Stupanj je djelovanja napojnih pumpi η_p:

$\eta_p = 0{,}9 \ldots 0{,}97$	– kod stapnih pumpi s neposrednim djelovanjem pogonskog stroja na stapajicu pumpe
$\eta_p = 0{,}8 \ldots 0{,}9$	– kod normalnih stapnih pumpi
$\eta_p = 0{,}6 \ldots 0{,}9$	– kod turbopumpi.

Za visokotlačne parne kotlove, kod kojih moramo uzeti u obzir povećanje gustoće vode pri napajanju, računamo teorijsku snagu pumpe pomoću entalpijske razlike vode

$$P_0 = q_{mp}(h_v - h_r)$$

gdje su: h_r specifična entalpija vode pri atmosferskom tlaku p_a i temperaturi ispred napojne pumpe, h_v specifična entalpija vode nakon izentropske kompresije u pumpi.

RADNA SPOSOBNOST PARE

Energija pare je uporabljiva u cijelosti samo kao toplina koju možemo prenositi s jednog tijela na drugo (grijanje). Međutim, čitava energija pare nije na raspolaganju za pretvorbu u mehanički rad.[1)]

Eksergija pare je tehnička radna sposobnost pare (sposobnost za pretvorbu njezine entalpije u tehnički rad) s obzirom na okolno stanje p_0, T_0.

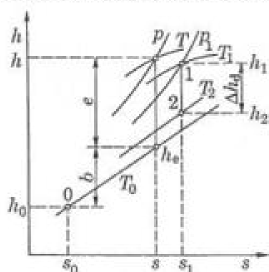
Specifična eksergija pare na izlazu iz parnog kotla iznosi

$$e = (h - h_0) - b; \qquad b = T_0(s - s_0)$$

gdje su: b specifična anergija pare; h, s specifična entalpija odnosno specifična entropija pare; h_0, s_0 specifična entalpija odnosno specifična entropija vode pri stanju okolice.

Specifična eksergija pare e pokazuje koji bi se dio energije pare mogao teorijski pretvoriti u tehnički rad s obzirom na temperaturu T_0 i tlak p_0 okolice.

Raspoloživi pad entalpije Δh_d



Eksergija pare međutim nije u cijelosti raspoloživa za pretvorbu u tehnički rad iz sljedećih razloga:

1. U cjevovodu od parnog kotla do parnog stroja para se ohlađuje s temperature T na T_1 ($T - T_1 = 5 \ldots 10$ K) i prigušuje s tlaka p na p_1 (uz brzinu protjecanja 30 ... 50 m/s iznosi $p - p_1$: pri srednjim tlakovima 2 ... 3 bar, pri najvišim tlakovima 10 ... 15 bar). Temperatura T_1 i tlak p_1 određuju specifičnu entalpiju h_1 pare ispred parnog stroja; $h_1 < h$.

1) Kako turbine, pumpe i kompresori predstavljaju uređaje koji rade po modelu otvorenog sustava, kod njih se pod pojmom mehaničkog rada misli na tehnički rad, tj. na rad stalnotlačnog procesa.

2. Na koncu izentropske ekspanzije pare ne postižemo temperaturu okolice T_0, nego temperaturu T_2 koja je viša $T_2 > T_0$, i to;

a) pri kondenzacijskim je napravama temperaturna razlika $T_2 - T_0$ malena ($t_2 = 28 \ldots 42$ °C) i služi samo za prijenos topline s pare na rashladnu vodu (temperaturi T_2 odgovara u kondenzatoru tlak p_2 od 0,04 ... 0,08 bar),
b) kod ispušnih je strojeva temperatura T_2 znatno viša ($t_2 = 102 \ldots 104$ °C) i odgovara konačnom tlaku p_2 koji je viši od atmosferskog za otpore trenja u ispušnim vodovima ($p_2 = 1{,}1 \ldots 1{,}2$ bar),
c) kod protutlačnih je strojeva temperatura T_2 još viša ($t_2 = 120 \ldots 180$ °C) te joj odgovaraju i viši konačni tlakovi ($p_2 = 2 \ldots 10$ bar).

Konačna je specifična entalpija pare h_2 stoga viša.

Raspoloživi pad entalpije Δh_d dan je razlikom specifične entalpije h_1, koja je određena početnim stanjem (p_1, T_1), i konačne specifične entalpije h_2, koja je određena izentropom i temperaturom T_2 (tlakom p_2):

$$\Delta h_d = h_1 - h_2 < e.$$

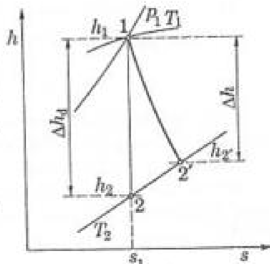
PARNI STROJEVI

Parni strojevi su pogonski strojevi koji rabe vodenu paru kao neposredno pogonsko sredstvo; to su stapni strojevi i parne turbine. (Iznimno su parni strojevi proizvedeni i za pogon drugim parama, npr. živinim.)

Snaga parnih strojeva proizlazi iz protočne mase q_m i raspoloživog entalpijskog pada Δh_d (v. str. 260).

Teorijska je snaga P_0

$$P_0 = q_m \Delta h_d = q_m(h_1 - h_2).$$



Stvarni entalpijski pad Δh manji je od raspoloživoga zbog unutarnjih gubitaka u stroju (prigušivanje pare, toplinska izmjena između pare i stijenki stroja, nepotpuna ekspanzija itd.)

$$\Delta h = h_1 - h_2' < \Delta h_d$$

gdje je h_2' stvarna specifična entalpija pare na izlazu iz stroja.

Unutarnji stupanj djelovanja stroja

$$\eta_i = \Delta h / \Delta h_d$$

pokazuje koji dio raspoloživoga entalpijskog pada parni stroj stvarno iskorištava i time označuje stupanj valjanosti stroja.

Unutarnja je snaga stroja P_i

$$P_i = q_m \Delta h = \eta_i q_m \Delta h_d = \eta_i P_0 .$$

Efektivna snaga stroja P (na pogonskoj osovini) manja je zbog vanjskih gubitaka stroja (mehaničkih gubitaka zbog trenja u ležajima i zglobovima stroja, pogona regulatora itd.) i iznosi

$$P = \eta_m P_i = \eta P_0 = \eta q_m \Delta h_d$$

gdje su: η_m mehanički stupanj djelovanja stroja, η ukupni stupanj djelovanja stroja

$$\eta = \eta_i \eta_m .$$

*

Valjanost se stroja još gdjekad u praksi izražava – umjesto pravilno korisnošću – »jediničnim potroškom pare«, i to s obzirom na unutarnju snagu

$$q_m/P_i = 1/(\eta_i \cdot \Delta h_d)$$

ili s obzirom na efektivnu snagu

$$q_m/P = 1/(\eta_i \cdot \Delta h_d)$$

što međutim ne pokazuje stvarne vrijednosti stroja. Jedinični potrošak pare nije naime ovisan samo o unutarnjem stupnju djelovanja η_u odnosno η, već i o raspoloživom entalpijskom padu Δh_d, a on ne ovisi o stroju.

Stapni parni strojevi

Stapni parni strojevi bili su prvi i stoga posebno značajni pogonski toplinski strojevi. Danas su stabilne stapne parne strojeve potisnule parne turbine, dok su brodske i lokomotivske parne strojeve zamijenili posebno dizel-motori, a na željeznici još i električna vuča. Iznimka su neke novije izvedbe brzih »parnih motora«.

Indicirana je snaga stroja P_{ind}

$$P_{ind} = (d^2 - d_b^2)\frac{\pi}{4} P_{med}\, s\, 2\, i\, n$$

gdje su: d promjer parnog cilindra, d_b promjer stapajice (u radnom prostoru cilindra), p_{med} srednji indicirani tlak u cilindru, s stapaj, i broj cilindra (dvoradnih), n brzinu vrtnje.

Zanemarimo li gubitak topline sa cilindra na okolicu i gubitke pare zbog propusnosti stapa i razvodnika, indicirana snaga P_{ind} približno je jednaka unutarnjoj snazi P_i

$$P_{ind} = P_i .$$

Srednji indicirani tlak u cilindru P_{med} određujemo iz indikatorskog dijagrama koji dobivamo indiciranjem. On ovisi u prvom redu o ulaznom tlaku pare p_1, punjenju ε (dijelu stapaja za vrijeme kojega ulazi para u cilindar) i brzini vrtnje n.

Srednji tlak u cilindru izražavamo kao dio ulaznog tlaka

$$P_{med} = \alpha\, p_1 \qquad \alpha < 1.$$

Faktor α ovisi o punjenu ε i brzini vrtnje n te raste s većim punjenjem (ε = 0,1 ... 0,8) i manjom brzinom vrtnje n, a iznosi:

$$\alpha = 0{,}25 \ldots 0{,}75.$$

Trošenje stapnih prstenova smanjujemo ograničavanjem »srednje stapne brzine« $v_{med} = 2\, s\, n$.

Brzina vrtnje n ograničena je inercijom masa mehanizama u translatornom gibanju, tj. stapa, stapajice, križne glave i dijela ojnice (približno 2/5).

Stupnjevi djelovanja:

– inducirani stupanj djelovanja $\eta_{ind} = P_{ind}/P_0$ ovisi u prvom redu o punjenju ε i brzini n, a približno je jednaka unutarnjem stupnju djelovanja: $\eta_{ind} \approx \eta_i$.

– mehanički stupanj djelovanja η_m također ovisi o brzini vrtnje n. Najbolje vrijednosti ukupnog stupnja djelovanja $\eta = \eta_i \eta_m$ ispušnih stapnih strojeva na pregrijanu paru iznose

$$\eta = 0{,}55 \ldots 0{,}75.$$

Manje se vrijednosti odnose na malene, a veće na velike strojeve.

Parne turbine

Parne su turbine brzi rotacijski strojevi koji rade povoljno pri konstantnoj brzini vrtnje. Stoga su idealni strojevi za pogon električnih generatora.

U usporedbi sa stapnim parnim strojevima parne turbine imaju određene prednosti, u ponajprije jednoličniji pogon i veću mogućnost izvedbe od najmanjih do najvećih jedinica (0,5 ... 200 000 kW i više). Ispušna je para u njih praktički bez ulja. Kod manjih izvedbi, npr. kao pomoćni strojevi, parne turbine imaju doduše manju korisnost nego stapni strojevi, ali su zato jednostavnije i lakše te i u tom slučaju dolaze u obzir. Parne turbine nisu prikladne za rad pri veoma promjenljivim brzinama vrtnje. Osim toga turbina se može okretati samo u jednom smislu.

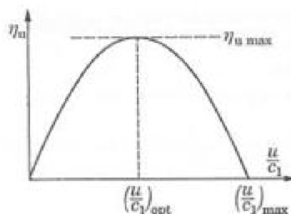
U parnim se turbinama toplinska energija pare (raspoloživi entalpijski pad Δh_d) pretvara u kinetičku energiju parnog mlaza koji se – djelovanjem na pokretne lopatice rotora – pretvara u tehnički rad.

Apsolutne brzine mlaza – c_1 na ulazu u rotorske lopatice i c_2 na izlazu iz njih – ovisne su od raspoloživog entalpijskog pada u samom statoru (stalnotlačno djelovanje – akcijsko) ili u statoru i rotoru (pretlačno djelovanje – reakcijsko).

Snaga turbine na obodu lopatičkog kola P_u je

$$P_u = q_m u\, (c_1 \cos \alpha_1 + c_2 \cos \alpha_2)$$

gdje su: q_m protok parne mase, u obodna brzina kola (lopatica), α_1 kut između apsolutne ulazne brzine i obodne brzine, α_2 kut između apsolutne izlazne brzine i obodne brzine.



Obodna brzina u određena je promjerom lopatičnog kola d i brzinom vrtnje n

$$u = d \pi n.$$

Stupanj djelovanja na obodu lopatičnoga kola η_u jest omjer snage na obodu P_u i teorijske snage P_0 (v. str. 261); ona ovisi o omjeru obodne brzine i apsolutne ulazne brzine u/c_1

$$\eta_u = P_u/P_0 = f(u/c_1).$$

Najveći stupanj djelovanja $\eta_{u\,max}$ dobivamo pri optimalnom omjeru $(u/c_1)_{opt}$ koji je kod:

akcijskih stupnjeva	0,4 ... 0,5
reakcijskih stupnjeva	0,6 ... 0,7.

Turbina radi dakle s dobrim stupnjem djelovanja η_u samo u uskom području obodnih brzina u odnosno brzina vrtnje n. Pri naglom rasterećenju mogla bi pobjeći do brzine koja odgovara omjeru $(u/c_1)_{max} \approx 2(u/c_1)_{opt}$ (što regulator mora spriječiti). S obzirom na čvrstoću turbinskog rotora brzine vrtnje n ograničene su maksimalnim obodnim brzinama u koje iznose 120 ... 400 m/s, no veće se vrijednosti mogu postići samo najboljim izvedbama (oblik kola, tvar!).

Obodnu brzinu smanjujemo stupnjevanjem brzine u više rotorskih vijenaca lopatica (Curtisovo kolo) ili izvedbom s više akcijskih ili reakcijskih stupnjeva. Izvedene turbine većinom su kombinacije osnovnih tipova.

Unutarnja je snaga turbine P_i

$$P_i = q_m \, \Delta h$$

gdje je Δh stvarni entalpijski pad (v. str. 261).

Unutarnja snaga P_i manja je od obodne P_u za unutarnje gubitke trenja i ventilacije: $P_i < P_u$. Budući da su ti gubitci neznatni, uzimamo da je unutarnja snaga P_i približno jednaka obodnoj snazi P_u : $P_i \approx P_u$.

Unutarnji je stupanj djelovanja η_i

$$\eta_i = P_i/P_0 \approx \eta_u.$$

Najveće su vrijednosti unutarnjeg stupnja djelovanja η_i, mehaničkog stupnja djelovanja η_m i ukupnog stupnja djelovanja $\eta = \eta_i \, \eta_m$ parnih turbina:

Vrsta turbine	η_i	η_m	η
velike, više stupnjeva	0,80 ... 0,86	0,985	0,79 ... 0,85
srednje	0,72 ... 0,78	0,98	0,70 ... 0,76
malene, nekoliko stupnjeva	0,60 ... 0,70	0,97	0,58 ... 0,68
osobito malene	–	–	< 0,50

Najuobičajenije vrijednosti tlaka p i temperature t pare ispred turbine:

snaga	malena	srednja	velika
p/bar	15 ... 30	40 ... 70	100 ... 200
t/°C	320 ... 450	450 ... 500	500 ... 600

Vrste turbina:

Kondenzacijske parne turbine iskorišćuju ukupni entalpijski pad (od tlaka svježe pare do kondenzacijskog tlaka). Imaju velik broj stupnjeva (visokotlačnih, srednjetlačnih i niskotlačnih) koji mogu biti raspoređeni u nekoliko kućišta pa i na više osovina. Rabe se u parnim termoelektranama.

Pri regenerativnom zagrijavanju napojne vode (v. str. 269) rabe se kondenzacijske parne turbine s oduzimanjem pare.

Industrijske parne turbine prilagođene su posebnim potrebama, npr:

- protutlačne turbine, koje iskorišćuju samo gornji dio entalpijskog pada, imaju manji broj stupnjeva (visokotlačnih i srednjetlačnih) pa su razmjerno manje. (Rabe se također za toplane.)
- turbine na otpadnu paru (iz drugih izvora) imaju samo niskotlačne stupnjeve.

KONDENZACIJA

Iz parnog stroja otječe protočna masa q_m većinom već mokre pare ($x > 0,9$) tlaka p_2 i odgovarajuće temperature T_2 te specifične entalpije h_2'. U kondenzatoru predaje para pri konstantnom tlaku p_2 toplinski tok Φ, zbog čega se potpuno pretvara u kapljevinu (kondenzira) i obično još nešto pothladi do temperature kondenzata T_k ($< T_2$) i entalpije h_k

$$(T_2 - T_k = 0 \dots 5 \text{ K}).$$

Zanemarimo li neznatan neposredni prijelaz topline s kondenzatora na okolicu, toplinski tok Φ prelazi na rashladnu vodu, koja se pri protočnoj masi q_{mv} ugrijava od temperature T_{v1} na T_{v2}. Ako je c specifični toplinski kapacitet vode, onda je

$$\Phi = q_m (h_{2'} - h_k) = q_{mv} \, c \, (T_{v2} - T_{v1}).$$

U površinskih kondenzatora toplina mora prolaziti kroz stijenke, zbog čega rashladna voda mora uvijek biti hladnija od pare: $T_{v2} < T_k$; u kondenzatora na miješanje para i rashladna voda su u neposrednom dodiru pa se konačne temperature izjednačuju: $T_{v2} = T_k$.

Ulazna je temperatura rashladne vode T_{v1}:

	t_{v1}
a) pri dovođenju vode neposredno iz okolice	
iz rijeke, jezera ili mora	0 ... 25 °C
iz bunara	5 ... 15 °C
b) pri dovođenju vode iz rashladnog tornja	20 ... 35 °C.

Da bismo postigli što veći podtlak u kondenzatoru, dopuštamo samo neznatno zagrijavanje vode u kondenzatoru:

$$\Delta T = T_{v2} - T_{v1} = 5 \ldots 10 \text{ K}.$$

Zbog toga je potrebna vrlo velika količina rashladne vode, a njezina protočna masa q_{mv} zavisi od protočne mase pare q_m i iznosi u:

površinskih kondenzatora $q_{mv} = (50 \ldots 60)\, q_m$
kondenzatora na miješanje $q_{mv} = (25 \ldots 30)\, q_m$.

Ovisno o temperaturi rashladne vode postižemo u kondenzatoru tlak sa:

vodom iz okolice 0,04 ... 0,05 bar
vodom iz rashladnog tornja 0,07 ... 0,08 bar.

U površinskom kondenzatoru, iako je rashladna voda obične prirodne čistoće, dobivamo potpuno čist kondenzat (destilacija!) koji je vrlo prikladan za napajanje parnih kotlova. U kondenzatoru na miješanje kondenzat se miješa s rashladnom vodom pa čistoća takve mješavine zavisi od čistoće rashladne vode. Rabimo li tu mješavinu za napajanje parnih kotlova, mora rashladna voda biti u odgovarajućoj mjeri očišćena (kemijski omekšana).

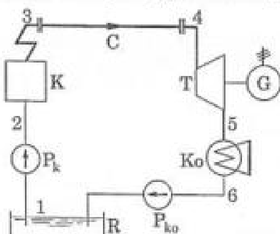
Zrak u pari (koji se u kondenzatoru ne kondenzira) isisavamo iz kondenzatora posebnim zračnim pumpama ili ejektorima (vodenim ili parnim mlazom).

Proračun izmjenjivačke površine kondenzatora vidi na str. 254. Pri brzini rashladne vode u cijevima $v = 1{,}5 \ldots 2{,}5$ m/s koeficijent je prolaza topline $k = 2\,900 \ldots 4\,100$ W/(m² K). (Prosječno možemo za jediničnu protočnu paru $q_m = 1$ kg/s računati s površinom od 75 ... 100 m².)

PARNA POSTROJENJA

Kondenzacijska parna postrojenja namijenjena su isključivo za proizvodnju mehaničke energije, većinom za pogon električnih generatora u parnim termoelektranama.

Jednostavno kondenzacijsko parno postrojenje s kružnim protočnim masama vode-pare q_m prikazano je u sljedećoj shemi:



R spremnik napojne vode
P_k napojna pumpa
K parni kotao
C parni cjevovod
T parni stroj (turbina)
G električni generator
Ko kondenzator
P_{ko} kondenzatna pumpa

Voda-para na kružnom putu mijenja svoje toplinsko stanje. Karakteristična mjesta različitih toplinskih stanja označena su u shemi brojevima od 1 do 6, a tako i u T, s dijagramu:

Stanje na mjestu	Temperatura	Tlak	Specifična entalpija
1	T_r	p_a	h_r
2	T_v	p	h_v
3	T	p	h
4	T_1	p_1	h_1
5	T_2	p_2	$h_{2'}$
6	T_k	p_2	h_k

Promjene specifične entalpije vode-pare zbog promjene stanja u:

1–2 napojnoj pumpi za $+ (h_v - h_r)$
2–3 parnom kotlu za $+ (h - h_v)$
3–4 parnom vodu za $- (h - h_1)$
4–5 parnom stroju (turbini) za $- (h_1 - h_{2'})$
5–6 kondenzatoru za $- (h_{2'} - h_k)$
6–1 kondenzatnoj pumpi za $+ (h_r - h_k)$

Za jednostavno kondenzacijsko parno postrojenje možemo obično uzeti

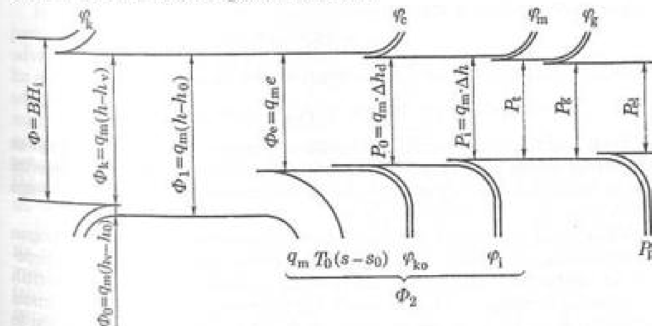
$$T_k \approx T_r \approx T_v \quad \text{i} \quad h_k \approx h_r \approx h_v$$

pa su u tom slučaju točke 6, 1 i 2 u T, s dijagramu gotovo identične.

Pri kratkim parnim vodovima između parnog kotla i parnog stroja (turbine) također je:

$$T \approx T_1 \quad \text{i} \quad p \approx p_1 \quad \text{i zato} \quad h \approx h_1$$

pa su točke 3 i 4 također gotovo identične.



Shema energijskog toka kroz parno postrojenje u termoelektrani

S ugljenom dovodimo u parni kotao toplinski tok Φ. Zbog gubitaka u kotlu Φ_k na napojnu vodu prelazi samo toplinski tok Φ_k. Tome se pridružuje toplinski tok Φ_0 što ga dovodimo s toplom napojnom vodom, jer je njezina temperatura T_v obično viša od temperature okolice T_0 $(T_v > T_0)$, i to stoga što je temperatura kondenzata koji pritječe u spremnik napojne vode viša od temperature okolice (pogotovu pri hlađenju kondenzatora vodom iz rashladnog tornja). Osim toga često iskorišćuje još i otpadnu toplinu ispušne pare iz pomoćnih parnih strojeva itd. za zagrijavanje napojne vode.

Para donosi iz parnog kotla toplinski tok

$$\Phi_1 = \Phi_k + \Phi_0 = q_m (h - h_0).$$

Od tog toplinskog toka za pretvorbu u rad sposoban je samo eksergijski tok

$$\Phi_e = q_m e = q_m (h - h_e) = \Phi_1 - q_m T_0 (s - s_0).$$

Za pretvorbu u rad ostaje neiskorišten još i eksergijski gubitak zbog gubitaka u parnom vodu

$$\varphi_c = q_m (h - h_1)$$

i gubitak zbog kondenzacije pare pri temperaturi T_2, koja je viša od temperature okolice T_0 $(T_2 > T_0)$

$$\varphi_{k0} = q_m (h_2 - h_e).$$

Preostalom raspoloživom padu entalpije $\Delta h_d = h_1 - h_2$ odgovarajući toplinski tok određuje teorijsku snagu stroja

$$\Phi_d = \Phi_e - (\varphi_c + \varphi_{k0}) = q_m \Delta h_d = P_0 .$$

Unutarnji gubitci u stroju

$$\varphi_i = q_m (h_2' - h_2)$$

smanjuju toplinski tok na Φ_i i određuju unutarnju snagu stroja P_i

$$\Phi_i = \Phi_d - \varphi_i = \Phi_e - (\varphi_c + \varphi_{k0} + \varphi_i) = q_m \Delta h = P_i .$$

Zbog dodatnih mehaničkih gubitaka u parnom stroju φ_m smanjuje se unutarnja snaga parnog stroj P_i na efektivnu (stvarnu) snagu na osovini stroja (turbine) P_t, a zbog gubitaka u električnom generatoru φ_g snaga generatora P_g još je manja $(P_g < P_t)$.

Vlastiti potrošak električne energije u termoelektrani P_p služi za pogon elektromotora za dizalice i transportne naprave (transport ugljena i pepela), za ventilatore, pumpe itd., za rasvjetu, grijanje i napajanje različitih električnih uređaja u elektrani. Za taj potrošak, koji prosječno iznosi približno 8 ... 10 % snage generatora P_g, smanjuje se snaga P_{el} što je termoelektrana predaje mreži.

Stupnjevi djelovanja

parnog kotla:		$\eta_k = \Phi_k/\Phi = q_m(h - h_v)/B\,H_i$
termički	– eksergije	$\eta_e = e/(h - h_0)$
	– raspoloživog pada entalpije	$\eta_d = \Delta h_d/e$
	– ukupno	$\eta_{th} = \eta_e\,\eta_d = \Delta h_d/(h - h_0)$
parnog stroja:	– unutarnji	$\eta_i = P_i/P_0 = \Delta h/\Delta h_d$
	– mehanički	$\eta_m = P_t/P_i$
	– ukupni (turbine)	$\eta_t = \eta_i\,\eta_m = P_t/q_m\,\Delta h_d$
električnoga generatora		$\eta_g = P_g/P_t$

Ukupni stupanj djelovanja termoelektrane

$$\eta_{tot} = \left(\eta_k + \frac{\Phi_0}{\Phi}\right) \cdot \eta_{th} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \frac{P_{el}}{P_g} = \frac{P_{el}}{B\,H_i} .$$

Kad je temperatura napojne vode T_v približno jednaka temperaturi okolice T_0, tako da njihovu razliku možemo zanemariti $(T_v = T_0)$, onda vrijedi

$$h_v = h_0 \quad \text{i} \quad \Phi_0 = 0$$

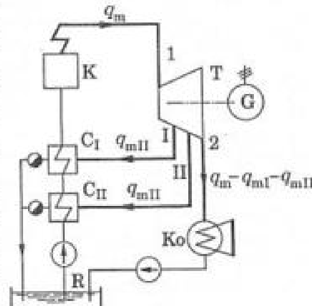
pa je

$$\eta_{tot} = \eta_k \cdot \eta_{th} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \frac{P_{el}}{P_g} = \frac{P_{el}}{B\,H_i} .$$

Najlošiji je eksergijski stupanj djelovanja η_e. Da bi ga popravili, težimo što većoj eksergiji pare, koju postižemo što višom temperaturom pare i odgovarajućim visokim tlakom. Temperature su vrlo ograničene (otpornošću stijenki pregrijača) i iznose 360 ... 560 (... 650) °C, dok su tlakovi gotovo neograničeni i iznose 12 ... 160 (... 300 i više) bara.

Regenerativno grijanje napojne vode

Iz parnog kotla dovodimo protočnu masu pare q_m u kondenzacijsku parnu turbinu s oduzimanjem, iz koje odvodimo kod prvog odvojka I (pri tlaku p_I) protočnu masu q_{mI}, kod drugog odvojka II (pri tlaku p_{II}) protočnu masu q_{mII} dok preostala protočna masa $q_m - q_{mI} - q_{mII}$ prelazi nakon potpune ekspanzije u kondenzator. Oduzetim parama zagrijavamo napojnu vodu u zagrijačima C_I i C_{II}.

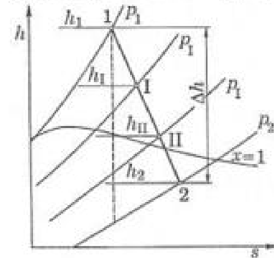


U površinskim zagrijačima ogrjevna se para kondenzira, a kondenzat vodimo u spremnik napojne vode – (slika); u zagrijačima s miješanjem ogrjevna se para miješa s napojnom vodom.

Unutarnja snaga turbine smanjila se zbog oduzimanja ogrjevne pare protočnih masa q_{mI} i q_{mII} te je

$$P_i = q_m \Delta h - [q_{mI}(h_I - h_2) + q_{mII}(h_{II} - h_2)]$$

gdje su specifične entalpije pare: h_I na odvojku I, h_{II} na odvojku II, h_2 na izlazu iz turbine u kondenzator.



U zagrijačima C_I i C_{II} (te s kondenzatom što ga uvodimo u spremnik napojne vode) prenosi ogrjevna para na napojnu vodu toplinski tok

$$\Phi_g = q_{mI}(h_I - h_r) + q_{mII}(h_{II} - h_r)$$

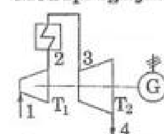
gdje je h_r specifična entalpija napojne vode u spremniku R.

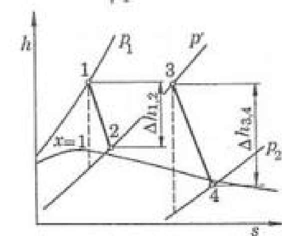
Toplinskom toku Φ_0, što ga s već zagrijanom napojnom vodom dovodimo u parni kotao (vidi shemu energijskog toka na str. 267), pridružuje se još toplinski tok Φ_g.

Budući da je $h_r \ll h_2$, bit će smanjenje unutarnje snage turbine znatno manje od povećanja topline koju regenerativno dovodimo napojnoj vodi. Zato se ukupna korisnost povećava i to prosječno za 6 do 12 %.

Pri regenerativnom zagrijavanju napojne vode, voda se u jednom stupnju zagrijava za približno 40 °C, za što se potroši oko 5 ... 10 % pare, koja prilazi turbini. (Pri peterostupanjskom regenerativnom zagrijavanju dolazi do kondenzatora samo još 75 ... 50 % pare koja prilazi turbini.) Za jednaku snagu turbine je stoga potrebna osjetno veća protočna masa svježe pare (q_m) nego pri turbini bez regenerativnog zagrijavanja.

Međupregrijavanje





Pri velikoj ekspanziji s visokoga početnog tlaka i temperature do vrlo niskog tlaka u kondenzatoru prešla bi para pri kraju ekspanzije u veoma vlažno područje ($x < 0,9$), što bi u niskotlačnim stupnjevima parnih turbina izazvalo nedopuštenu *eroziju* lopatica. Da to spriječimo, pregrijavamo paru u međupregrijaču (dimnim plinovima parnog kotla ili svježom vrućom parom), tako da u svakom slučaju ostane njezin sadržaj pare $x \geq 0,9$.

Za međupregrijavanje treba nam dodatni toplinski tok

$$\Phi_{2,3} = q_m (h_3 - h_2)$$

pri čemu je q_m protočna masa pare pri ulazu u međupregrijač.

U obim turbinama T_1 i T_2 dobivamo pri jednakoj protočnoj masi pare q_m (tj. bez oduzimanja) unutarnju snagu

$$P_i = q_m [(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)].$$

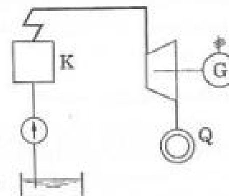
Međupregrijavanje pare je uvijek združeno i s regenerativnim zagrijavanjem napojne vode. U tom je slučaju prvo oduzimanje pare u točki stanja 2, a sljedeća se oduzimanja smještaju na drugu turbinu (T_2).

Proizvodnja električne i toplinske energije (toplane)

U kondenzacijskom parnom postrojenju odvodimo s rashladnom vodom znatan toplinski tok

$$\Phi_2 = q_m (h_2' - h_0)$$

koji se sastoji od dijela toplinskog toka $q_m T_0(s - s_0)$ koji se neda pretvoriti u rad, od eksergijskih gubitaka $q_m(e - \Delta h_d)$ i od unutarnjih gubitaka parnog stroja $q_m(\Delta h_d - \Delta h)$; v. str. 270. Taj se toplinski tok Φ_2 odvodi pri temperaturi T_2, koja je u kondenzacijskom parnom postrojenju samo nešto viša od temperature okolice T_0, pa zato, općenito, nije uporabljiva za grijanje (osim za grijanje kupališnih bazena itd., gdje je dovoljna i mala temperaturna razlika $T_2 - T_0$).



Povišenjem protutlaka p_2 povisujemo i temperaturu T_2 pare iza parnog stroja, zbog čega para postaje prikladnom za grijanje. Zato takvu paru vodimo iz parnog stroja – umjesto u kondenzator – prema potrošačima topline Q.

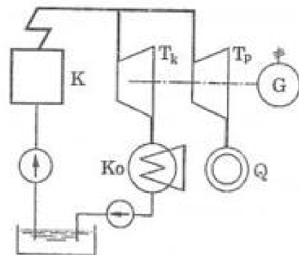
Ukoliko se sav čisti kondenzat ne vraća od potrošača topline u spremnik napojne vode, moramo manjak nadomjestiti očišćenom (omekšanom) vodom iz okolice.

Pri različitim protutlakovima p_2 postižemo sljedeće temperature t_2 koje su prikladne za grijanje zgrada ili industrijskih naprava (osobito u papirnoj, tekstilnoj, kemijskoj i srodnoj industriji itd.):

p_2/bar	1	2	4	6	8	10	12	16
t_2/°C	100	120	144	159	170	180	188	201

Povišenjem protutlaka p_2 smanjuje se doduše specifični entalpijski pad Δh, a time i unutarnja snaga stroja $P_i = q_m \Delta h$, ali zato ostaje za grijanje uporabljiv sav toplinski tok $\Phi_2 = q_m (h_2' - h_0)$. Stoga se znatno povećava ekonomičnost pri skupnoj proizvodnji tehničkog rada za pogon generatora i topline za grijanje.

Zbog povišenja protutlaka p_2 postaje suvišan niskotlačni dio parnog stroja (turbine). Budući da se, osim toga, para iz stroja odvodi neposredno potrošačima topline, nije više potreban ni kondenzator sa svim uređajima za rashladnu vodu. Cjelokupno se postrojenje veoma pojednostavljuje.



Tamo gdje se ne može vremenski potpuno uskladiti potrošak električne energije i topline za grijanje, prikladna je kombinacija dviju turbina – kondenzacijske T_k i protutlačne T_p. Protutlačna turbina daje toliko mehaničke energije koliko to odgovara potrošku topline, dok kondenzacijska turbina dobavlja ostatak potrebne mehaničke energije. Dovod svježe pare objema turbinama izveden je automatskim regulatorima tako da protutlačnom turbinom upravlja tlačni regulator, a kondenzacijskom regulator brzine vrtnje.

MOTORI S UNUTARNJIM IZGARANJEM

Motori s unutarnjim izgaranjem su stapni strojevi kojima dovodimo prikladna goriva (koja ne ostavljaju pepela, smolastih ostataka itd.) zajedno sa zrakom za izgaranje neposredno u cilindar, gdje izgaraju i oslobađajući toplinu povisuju tlak koji djeluje na stap i obavlja mehanički rad.

Sustavi Otto i Diesel

Sustav Otto. Smjesu goriva i zraka za izgaranje, pripremljenu izvan cilindra, uvodimo u cilindar u kojem stap komprimira (do 7 ... 11 bar). Pri koncu kompresije smjesa se pali električnom iskrom, našto u cilindru poraste tlak (25 ... 40 bar) koji pri sljedećem – radnom – stapaju služi za obavljanje rada.

U motorima sustava Otto rabimo:

a) plinovita goriva (rasvjetni, koksni, generatorski, grotleni ili sličan plin), koja se miješaju sa zrakom u ventilu za miješanje prije usisavanja ili u posebno konstruiranom usisnom ventilu;

b) kapljevita goriva (benzin, benzen, alkohol itd.), koja se u rasplinjaču (karburatoru) raspršuju (ne rasplinjuju!) u zraku za izgaranje kao fina maglica, a zatim se gorivo tek u cilindru pretvara u paru (plin) zbog kompresije i dovođenja topline sa stijenki.

Izgaranje u sustavu Otto zbiva se približno po izohori (V_k – v. str. 274).

– *Sustav Diesel.* Čisti zrak za izgaranje uvodimo u cilindar u kojem ga stap tako snažno komprimira (do 25 ... 40 bar) da se pri kraju kompresije postiže temperatura paljenja goriva (550 ... 700 °C), koje u tom trenutku ubrizgavamo u cilindar. Povećani tlak (60 ... 100 bar), prouzročen izgaranjem, služi pri sljedećem – radnom – stapaju za obavljanje rada.

U dizelskim motorima rabimo jeftinija, poluteška i teška ulja (plinska i dizelska ulja). Posebnom visokotlačnom pumpom (350 ... 500 bar) ubrizgavamo gorivo kroz fine sapnice za raspršivanje u cilindar, tako da nastane uljna maglica koja se u vrućem komprimiranom zraku odmah zapali. Izgaranje se zbiva najprije približno po izohori (V_k), a zatim po izobari (p_{max} – slika na str. 274).

Za motore s užarenom glavom (»semidizelske motore«) rabimo isto gorivo kao i za dizelske motore. Gorivo se za vrijeme kompresije zraka (koja nije tako velika kao u dizelskih motora) ubrizgava u posebnu komoru za izgaranje, koja se – radi lakšeg paljenja – ne hladi pa je zato užarena.

Četverotaktni i dvotaktni motori

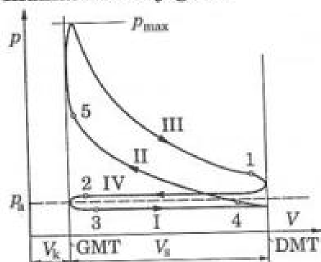
Četverotaktni motori imaju na svakom cilindru najmanje po dva ventila – usisni i ispušni.

U prvom taktu (I) stap se giba od gornje (GMT – vidi sliku indikatorskog dijagrama na str. 274) prema donjoj mrtvoj točki (DMT) pri otvorenom usisnom i zatvorenom ispušnom ventilu. U cilindru se stvara podtlak, zbog čega u cilindar ulazi smjesa goriva i zraka (Otto), odnosno čisti zrak (Diesel). U drugom se taktu (II) smjesa goriva odnosno čisti zrak komprimira (od DMT do GMT) – uz oba zatvorena ventila. Zatim slijedi paljenje smjese iskrom (Otto), odnosno paljenje goriva ubrizganog u vrući zrak (Diesel), a zatim izgorjeli plinovi – uz još uvijek zatvorene ventile – potiskuju stap (od GMT do DMT) obavljajući rad (treći takt – III). Konačno se otvara ispušni ventil, a pri ponovnom stapaju (od DMT do GMT) istiskuje stap izgorjele plinove iz cilindra (četvrti takt – IV).

Dvotaktni motori su većinom bez ventila. U njih se smjesa goriva sa zrakom (Otto) odnosno čist zrak (Diesel) tlači (pod malim pretlakom) u cilindar kroz raspore (za ispiranje), a izgorjeli plinovi se istiskuju kroz ispušne otvore. Svi se otvori otvaraju u odgovarajućem položaju stapa. Dvotaktni motori imaju samo kompresijski i radni takt; ulaženje smjese odnosno zraka i ispiranje cilindra te istiskivanje plinova zbiva se za kratko vrijeme dok su otvori između oba takta otvoreni.

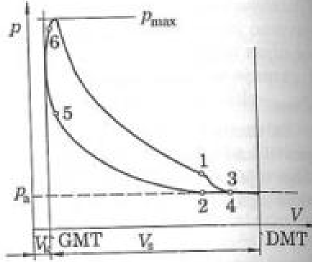
U usporedbi sa četverotaktnim motorima dvotaktni imaju sljedeće prednosti: veću snagu uz iste izmjere, ventile nadomještene otvorima i jednoličniji zakretni moment; nedostatci su pak: veće toplinsko opterećenje uz iste izmjere, potrebna je posebna pumpa za ispiranje (u malih su motora pumpe nadomještene pumpnim djelovanjem donjeg kućišta, a u sustavu Otto još su i gubitci zbog ispiranja izgorjelih plinova smjesom goriva. Stoga su laki motori sustava Otto većinom četverotaktni, a teški motori sustava Diesel obično dvotaktni.

Indikatorski dijagram



Četverotaktni motori sustava Otto

1 – otvaranje ispušnog ventila
2 – otvaranje usisnog ventila
3 – zatvaranje ispušnog ventila
4 – zatvaranje usisnog ventila
5 – paljenje električnom iskrom



Dvotaktni motori sustava Diesel

1 – otvaranje ispušnog raspora
2 – zatvaranje ispušnog raspora
3 – otvaranje raspora za ispiranje
4 – zatvaranje raspora za ispiranje
5 – početak ubrizgavanja goriva
6 – konac ubrizgavanja goriva

Barometarski tlak:	p_a
Kompresijski omjer:	$\varepsilon = (V_k + V_s)/V_k$
Obujam kompresijskog prostora:	V_k
Stapajni obujam:	$V_s = A\,s = \pi\,d^2/4 \cdot s$

gdje su: A površina stapa, d promjer stapa, s stapaj.

Ekonomičnost motora s unutarnjim izgaranjem

S gorivom dovodimo u motor toplinski tok $\Phi_1 = B\,H_i$ gdje su: B potrošak goriva u jedinici vremena kg/s, H_i donja ogrjevna vrijednost goriva.

Zbog gubitaka pri izgaranju (nepotpuno izgaranje) samo dio te topline prelazi na izgorjele plinove.

Budući da se u unutar cilindra stvaraju veoma visoke temperature (maksimalno do 2 000 °C, a srednje znatno niže), moramo motor hladiti, pa se zbog toga temperatura stijenki cilindra ustali na 250 ... 350 °C. Hlađenje je u manjih motora obično zračno, a u većih vodeno. Uporaba zračnog hlađenja ograničena je zbog malog koeficijenta prijelaza topline sa stijenki motora na zrak. Pri brzini rashladnog zraka v možemo računati s koeficijentom prijelaza:

v/(m/s)	1 ... 2	5 ... 10	20 ... 30	40 ... 50	60 ... 100	100 ... 200
α/(W/(m² K))	6 ... 12	30 ... 70	80 ... 150	160 ... 210	230 ... 350	350 ... 640

Pri hlađenju vodom najdjelotvornija je svježa rashladna voda okolice, koja se može ugrijati za 40 ... 70 °C do konačne temperature 70 ... 80 °C.

Pri hlađenju morskom vodom računamo s ugrijavanjem za 20 ... 40 °C i konačnom temperaturom do 50 °C (iznimno i do 60 °C). Pri cirkulacijskom (optočnom) hlađenju vodom (vozila!) ugrijavanje je 7 ... 10 °C, do konačne temperature 80 ... 90 °C.

Mnogo topline odlazi iz stroja još uvijek s vrlo vrućim ispušnim plinovima. Daljnji gubitci nastaju zbog prigušivanja i propusnosti stapova i ventila.

Zbog nepotpunog izgaranja, hlađenja stroja, topline ispušnih plinova i ostalih gubitaka odvodimo iz stroja toplinski tok Φ_2. On se sastoji od eksergijskog dijela (neiskorištene topline koja bi se teorijski još mogla pretvoriti u mehanički rad) i dijela koji nije iskoristiv za pretvorbu u rad.

Unutarnja snaga motora P_i proizlazi iz razlike među dovedenim i odvedenim toplinskim tokom

$$P_i = \Phi_1 - \Phi_2.$$

Unutarnju snagu P_i određujemo neposredno pomoću srednjeg indiciranog tlaka p_{med} u cilindru

$$P_i = p_{med}\,d^2\,\pi/4 \cdot 2\,s\,n/z \cdot i = p_{med}\,V_i \cdot 2\,n/z$$

gdje su: d promjer stapa, s stapaj, n brzina vrtnje, z broj taktova (4 ili 2), i broj cilindara (dvoradni cilindar vrijedi za dva), V_i stapajni obujam svih cilindara.

Srednji indicirani tlak p_{med} brzih motora ne možemo odrediti jednostavnim sredstvima. No možemo ga izračunati iz efektivne snage motora P

$$p_{med} = P/(V_i \cdot 2\,n/z \cdot \eta_m)$$

pri čemu efektivnu snagu motora P odredimo kočenjem, a mehanički stupanj djelovanja η_m pogonom motora iz stranog izvora. Srednji indicirani tlak p_{med} kreće se između 5 ... 9 bar.

Brzine vrtnje plinskih i dizelskih motora su 2 ... 40 s^{-1} (120 ... 2 400 min^{-1}), lakih motora za vozila 50 ... 100 s^{-1} (3 000 ... 6 000 min^{-1}).

Srednja brzina stapa $v = 2\,sn$ stabilnih motora ne premašuje vrijednost od 6 m/s, a motora za vozila doseže do 12 m/s (iznimno i do 18 m/s).

Termički stupanj djelovanja η_i je omjer između unutarnje snage P_i i dovedenog toplinskog toka $\Phi_1 = B\,H_i$; ovisi prvenstveno o kompresijskom omjeru ε (v. str. 274):

$$\eta_i = P_i/B\,H_i = f\,(1 - k/\varepsilon^{\varkappa-1})$$

gdje su: k faktor, ovisan o načinu izgaranja (Otto: $k \approx 1$, Diesel: $k > 1$), $\varkappa$ omjer specifičnih toplinskih kapaciteta ($= c_p/c_V$).

Termički stupanj djelovanja je dakle to veći što je veći kompresijski omjer ε. On je u motoru sustava Otto vrlo ograničen zbog opasnosti od detonacije (kompresija goriva smjese!), dok u dizelskih motora taj omjer može biti znatno veći (kompresija zraka!):

motori sustava Otto:	benzinski	$\varepsilon =$ 5 ... 8 (... 9)
	plinski	$\varepsilon =$ 6 ... 10
motori s užarenom glavom:		$\varepsilon =$ 8 ... 12

dizelski motori: $\varepsilon = 12 \ldots 25\ (\ldots 35)$.

Efektivna je snaga motora P

$$P = P_i \eta_m = B H_i \eta$$

gdje su: η_m mehanički stupanj djelovanja, η ukupni stupanj djelovanja.

Mehanički stupanj djelovanja η_m uzima u obzir gubitke zbog trenja u mehanizmu motora i pogon pomoćnih uređaja – električnoga generatora za sustav paljenja (Otto) ili pumpe za ulje (Diesel), ventilatora za zračno hlađenje ili ventilatora i pumpe za vodu pri hlađenju vodom itd.

Ukupni stupanj djelovanja η

$$\eta = \eta_i \eta_m = P/B H_i$$

uzima u obzir sve gubitke u motoru koji su, u prosjeku, raspodijeljeni približno ovako:

gubitci hlađenjem	28 %	gubitci zbog trenja itd.	10 %
toplina ispušnih plinova	30 %	(efektivna snaga stroja	30 %)
ostali unutarnji gubitci	2 %		

Ukupni stupanj djelovanja zavisi od opterećenja motora P i brzine vrtnje n, a iznosi u najpovoljnijem području rada kod:

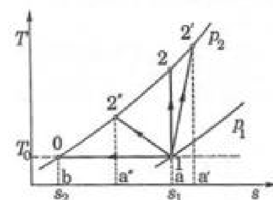
lakih benzinskih motora	$\eta = 0{,}22 \ldots 0{,}25$
plinskih motora	$\eta = 0{,}27 \ldots 0{,}35$
motora s užarenom glavom	$\eta = 0{,}22 \ldots 0{,}26$
malenih dizelskih motora	$\eta = 0{,}31 \ldots 0{,}36$
velikih dizelskih motora	$\eta = 0{,}40 \ldots 0{,}48$.

KOMPRESORI

Kompresori su strojevi koji komprimiraju plinove ili pare na određeni tlak. Pomoću njih dobivamo komprimirani zrak koji služi za pogon pneumatskog alata (6 ... 7 bar) ili metalurških peći itd. Daljnje uporabe kompresora su: daljinski transport plinova (36 bar), rashladni uređaji (12 bar), ukapljivanje zraka (200 bar), kemijski procesi (do 1 000 bar i više).

Promjene stanja plina pri kompresiji

1. *Izotermna kompresija* (1 – 0)



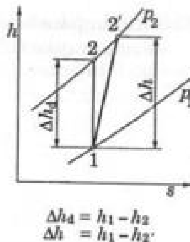
Potrebni rad (a 1 0 b a)

$$W_{1,0} = m R T_0 \ln \frac{p_1}{p_2} = m T_0 (s_2 - s_1)$$

Konačna je temperatura $T_0 = T_1 =$ const. Za vrijeme kompresije treba odvoditi toplinu (a 1 0 b a)

$$Q_0 = m T_0 (s_2 - s_1).$$

2. *Izentropska kompresija* (1 – 2) pri $s =$ const (tj. bez izmjene topline s okolicom i bez unutarnjeg trenja.)



$\Delta h_d = h_1 - h_2$
$\Delta h = h_1 - h_{2'}$

Potreban rad (a 2 0 b a)

$$W_{1,2} = m \,\Delta h_d = m\, c_p (T_1 - T_2)$$

$$= \frac{\varkappa}{\varkappa - 1} p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\varkappa - 1)/\varkappa}\right]$$

Konačna temperatura

$$T_2 = T_1 - \frac{\Delta h_d}{c_p} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\varkappa - 1)/\varkappa}.$$

3. *Adijabatska kompresija* (1 – 2′) – neravnotežna kompresija, koja se opisuje eksponentom m (m nije eksponent politrope). Takav se slučaj približno postiže kod brzohodnih kompresora bez hlađenja.

Potreban rad (a′ 2′ 0 b a′)

$$W_{12}{'} = m\, \Delta h = m\, c_p (T_1 - T_2{'}) = \frac{\varkappa}{\varkappa - 1} p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{m - 1/m}\right]$$

Konačna temperatura $\quad T_2{'} = T_1 - \dfrac{\Delta h}{c_p} = T_1 \left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{(n - 1)/n}$

4. *Politropska kompresija* s eksponentom politrope $1 < n < \varkappa$ (1 – 2″) (postiže se približno kod hlađenih stapnih kompresora).

Potreban rad (a 1 2″ 0 b a)

$$W_{1,2'} = \frac{n}{n - 1} p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{n - 1/n}\right].$$

Odvedena toplina (a 1 2″ a″ a)
$Q = (\varkappa - n)/(n\,(\varkappa - 1)) \cdot W_{1,2''}$

Konačna temperatura
$T_{2''} = T_1\, (p_2/p_1)^{(n-1)/n}$

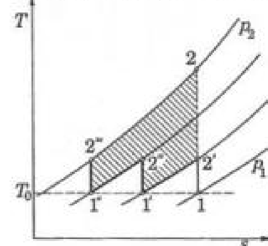
Uspoređivanjem različitih promjena stanja dobivamo:

$$W_{1,2'} > W_{1,2} > W_{1,2''} > W_{1,0} \qquad T_{2'} > T_2 > T_{2''} > T_0 .$$

Najmanji je rad potreban za izotermnu kompresiju ($W_{1,0}$), a najbliže smo joj pri obilnom hlađenju ($W_{1,2''}$). Najveći je rad potreban kod nehlađenih strojeva ($W_{1,2'}$).

Višestupanjska kompresija

Višestupanjska kompresija omogućuje da se, bez obzira na vrstu kompresora (hlađenoga ili nehlađenoga), veoma približimo izotermnoj kompresiji.



Iza svakog stupnja kompresije hladimo ugrijani komprimirani plin po mogućnosti do početne temperature T_0. Time štedimo rad koji je predočen u T, s dijagramu crtkanom površinom 2' 1' 2'' 1'' 2''' 2 2'.

Višestupanjska kompresija s međuhlađenjem poskupljuje uređaj što je veći broj stupnjeva. Stoga se obično ograničujemo na 2 do 4 stupnja. Tlačni je omjer svakog stupnja pri ukupno i stupnjeva

$$x = \sqrt[i]{p_2/p_1}.$$

Kompresija do visokih tlakova

Pri kompresiji na manje tlakove (do 30 bar) računamo s realnim plinovima kao da su idealni. Pri višim tlakovima moramo jednadžbu stanja korigirati faktorom kompresibilnosti k

$$p\,v = k\,R\,T.$$

Vrijednosti faktora kompresibilnosti k:

	$\frac{t}{°C}$	p/bar				
		0	100	300	600	1 000
H_2	0	1,0	1,07	1,20	1,42	1,71
	100	1,0	1,05	1,16	1,33	1,56
zrak[1)]	0	1,0	0,97	1,09	1,46	1,98
	100	1,0	1,03	1,15	1,39	1,80

Stapni kompresori

Jednostupanjskim stapnim kompresorom postižemo tlak do 5 (... 7) bar, a višestupanjskim postižemo u svakom stupnju tlačni omjer 3 ... 4.



Indikatorski dijagram

Stapajni obujam iznosi

$$V_s = A\,s = d^2\,\pi/4 \cdot s$$

gdje su: A presjek cilindra, d promjer cilindra, s stapaj.

Štetni prostor

$$V_0 = 0{,}04 \ldots 0{,}08\ (\ldots 0{,}15)\ V_s\,.$$

Dobavni obujam (pri tlaku p_1): V'

1) Za računanje sa zrakom kao pregrijanom parom vidi str. 199.

Dobava kompresora s obzirom na obujam plina pri početnom tlaku p_1 (ispred kompresora) iznosi kod jednoradnih kompresora

$$q_V = \lambda V_{s1}\, n_1\, i_1$$

gdje su: λ dobavni stupanj, V_{s1} stapajni obujam u prvom stupnju (niskotlačnom), n_1 brzina vrtnje u prvom stupnju, i_1 broj paralelno djelujućih cilindara u prvom stupnju (dvoradni cilindri računaju se dvostruko).

Dobavni stupanj

$$\lambda = \frac{q_V}{q_t}\,\lambda_0\,\eta_V$$

predstvalja odnos između stavrnog i teorijskog protočnog obujma

$$q_t\ (q_{Vt} = \lambda\, V_{s1}\, \eta_1\, i_1),$$

određen je »obujamnom korisnošću« $\eta_v = V'/V_s$ (koja se znatno smanjuje povećanjem štetnog prostora) i faktora λ_0 (< 1) koji uzima u obzir ugrijavanje plina pri usisavanju te propusnost stapa i ventila.

Dobavni stupanj pri:

malim kompresorima	$\lambda > 0{,}70$
puhalima (npr. za visoke peći)	$\lambda = 0{,}82 \ldots 0{,}90$
kompresorima za tlak do 7 bar	$\lambda = 0{,}86 \ldots 0{,}92.$

Pogonska snaga za kompresor. Unutarnja snaga P_i stapnih kompresora s hlađenim cilindrima približno je određena radom $W_{1,2}''$, potrebnim za politropsku kompresiju (v. str. 278 pod 4.), i to pri brzini vrtnje n

$$P_i = W_{1,2}'' \cdot n.$$

Pritom zanemarujemo neznatni rad ekspanzije zaostalog plina iz štetnog prostora. (Rad $W_{1,2}''$ računamo s eksponentom politrope $n = 1{,}32 \ldots 1{,}38$.)

Zapravo se kompresija ne zbiva po politropi s konstantnim eksponentom n, već najprije približno po izentropi ($n = \varkappa$), a zatim uz znatno odvođenje topline ($1 < n < \varkappa$).

Unutarnju snagu za svaki cilindar određujemo također pomoću srednjeg indiciranog tlaka p_{med} u cilindru presjeka A i stapaja s pri brzini vrtnje n

$$P_i' = p_{med}\, A\, s\, n.$$

Srednji indicirani tlak p_{med} možemo izračunati iz rada $W_{1,2}''$ (ako uzmemo u obzir da je $V_1 = V_0 + V_s$)

$$p_{med} = W_{1,2}''/V_s\,.$$

Ukupna unutarnja snaga za više cilindara iznosi

$$P_i = \Sigma\, P_i'.$$

Stvarno potrebna snaga za pogon kompresora iznosi

$$P = P/\eta_m$$

gdje je mehanički stupanj djelovanja stapnih kompresora $\eta_m = 0{,}78 \ldots 0{,}95.$

Turbokompresori

Turbokompresori su *radijalni* (po konstrukciji su slični turbopumpama) ili *aksijalni* (slični parnim turbinama).

U jednom se stupnju postižu samo manji kompresijski omjeri od 1,7 (... 4). Za više su tlakove potrebni višestupanjski kompresori.

Kompresija se u turbokompresorima zbiva po adijabati (slučaj 3 na str. 277). Pri kompresijskim omjerima preko 2,5 porast je temperature toliki da je potrebno međuhlađenje.

Snaga za pogon turbokompresora

Teorijsku snagu određuju izentropski rad $W_{1,2}$ i brzina vrtnje n

$$P_0 = W_{1,2} \cdot n = q_m \Delta h_d .$$

Unutarnja snaga je veća zbog unutarnjih gubitaka

$$P_i = W_{1,2'} \cdot n = q_m \Delta h = P_0/\eta_i$$

gdje je unutarnji stupanj djelovanja

$$\eta_i = P_0/P_i = q\, \Delta h_d/\Delta h .$$

Stvarna snaga još je veća zbog vanjskih mehaničkih gubitaka (trenja)

$$P = P_i/\eta_m = P_0/\eta = q_m\, \Delta h_d/\eta$$

pri čemu je mehanički stupanj djelovanja turbokompresora $\eta_m = 0{,}95 \ldots 0{,}98$, a ukupni stupanj djelovanja $\eta = \eta_i\, \eta_m$.

Dobavna protočna masa q_m (protok mase) turbokompresora dobiva se iz stvarne snage P, ukupnog stupnja djelovanja η i izentropske razlike entalpija Δh_d

$$q_m = \eta\, P/\Delta h_d .$$

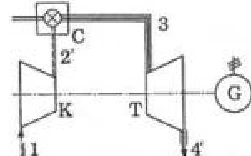
Dobavnu protočnu masu možemo također izraziti početnim obujmnim protokom q_V i početnom gustoćom plina ϱ

$$q_m = q_v\, \varrho .$$

PLINSKE TURBINE

Plinske turbine u širem smislu su pogonska postrojenja koja se sastoje – pri otvorenom procesu – od kompresora, komore za izgaranje i turbine.

Kompresor K tlači zrak iz atmosfere u komoru za izgaranje C, u kojoj izgara gorivo ubrizgano neposredno u komprimirani zrak (pri konstantnom tlaku). Izgorjeli (dimni) plinovi struje zatim kroz turbinu T koja dijelom svoje snage goni kompresor, a preostalom snagom generator G.



Kao gorivo možemo rabiti jeftinija kapljevita goriva, obično petrolej ili slično. Omjer potroška goriva B i protočne mase q_m iznosi

$$B/q_m = 0{,}008 \ldots 0{,}012 \text{ kg/kg}.$$

U komorama za izgaranje postižu se konačne temperature u:

stacionarnim strojevima 650 ... 700 °C

mlaznim strojevima 700 ... 850 °C.

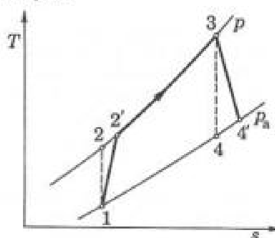
Pri otvorenom je procesu q_m protočna masa zraka kroz kompresor do komore za izgaranje, dok protok dimnih plinova koji nastaju u komori za izgaranje i struje kroz turbinu iznose

$$q_m' = q_m + B \approx q_m$$

a ujedno se neznatno mijenja specifični toplinski kapacitet c_p' dimnih plinova, pomoću kojeg računamo toplinski tok u komori za izgaranje i snagu turbine.

Proces plinske turbine možemo prikazati pojednostavljeno (bez veće grješke) pomoću procesa zraka (v. dijagram T, s).

Promjene stanja zraka



1-2': adijabatska kompresija od tlaka p_a na tlak p,

2'-3: dovođenje topline u komori za izgaranje pri tlaku p,

3-4': adijabatska ekspanzija (s trenjem) u turbini od tlaka p na tlak p_a,

4'-1: odvođenje topline u okolicu pri tlaku p_a.

Za adijabatsku kompresiju treba kompresoru snaga

$$P_{ik} = q_m c_p\, (T_2 - T_1)/\eta_{ik} = q_m c_p\, (T_{2'} - T_1)$$

gdje su q_m protočna masa zraka, c_p specifični toplinski kapacitet zraka, η_{ik} unutarnji stupanj djelovanja kompresora, T_1 početna temperatura zraka, T_2 konačna temperatura pri izentropskoj kompresiji, $T_{2'}$ stvarno postignuta konačna temperatura zraka (v. str. 277).

Unutarnji stupanj djelovanja kompresora iznosi

$$\eta_{ik} = (T_1 - T_2)/(T_{2'} - T_1) = 0{,}80 \ldots 0{,}87.$$

Komori za izgaranje dovodimo toplinski tok

$$\Phi = B\, H_i = q_m c_p\, (T_3 - T_{2'})/\eta_c$$

gdje su: B potrošak goriva u jedinici vremena kg/s, H_i donja ogrjevna vrijednost goriva, T_3 najviša temperatura u procesu (pri završetku dovođenja topline), η_c stupanj djelovanja gorionika.

Pri adijabatskoj ekspanziji dobivamo u turbini unutarnju snagu

$$P_{it} = q_m'\, c_p'\, (T_3 - T_4)/\eta_{it} = q_m'\, c'_p\, (T_3 - T_{4'})$$

gdje su: q_m' protočna masa dimnih plinova ($\approx q_m$), c_p' specifični toplinski kapacitet dimnih plinova ($\approx c_p$), T_4 konačna temperaturu pri izentropskoj ekspanziji, $T_{4'}$ temperatura zraka kod izlaza iz turbine, η_{it} unutarnji stupanj djelovanja turbine.

Unutarnji je stupanj djelovanja turbine

$$\eta_{it} = (T_3 - T_{4'})/(T_3 - T_4) = 0{,}85 \ldots 0{,}88 \ (\ldots 0{,}90).$$

Unutarnja je korisna snaga cjelokupnog postrojenja plinske turbine

$$P_i = P_{it} + P_{ik}$$

(pri čemu uporabljena snaga u kompresoru P_{ik} ima negativnu vrijednost).

Stvarna korisna snaga cjelokupnog postrojenja plinske turbine je zbog vanjskih gubitaka (trenja u ležajima, pogon regulatora itd.) manja

$$P = P_i \, \eta_m$$

gdje je η_m mehanički stupanj djelovanja postrojenja.

Ukupni je stupanj djelovanja postrojenja

$$\eta = P/B\,H_i = (P_{it} + P_{ik})/B\,H_i \cdot \eta_m .$$

Ukupni stupanj djelovanja η ovisi u prvom redu o omjeru obiju krajnjih temperatura T_3/T_1 (i to tako da raste s porastom tog omjera) i o tlačnom omjeru p/p_a. Svakom omjeru temperatura pripada određeni optimalni tlačni omjer pri kojem je η maksimalan, npr.

T_3/T_1	2,5	3	3,5
$(p/p_a)_{opt}$	3,6	5,8	8,3
η_{max}	0,18	0,22	0,24

Da bi se postigao što veći omjer temperatura, mora biti:

a) temperatura T_3 što viša, a ona je ograničena otpornošću tvari komore za izgaranje i turbine;

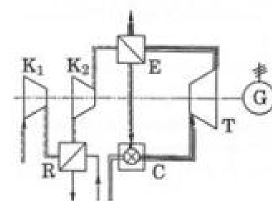
b) temperatura T_1 što niža, a ona ovisi o temperaturi okolice (stoga je korisnost veća zimi, u sjevernim zemljama ili na velikim visinama).

Cjelokupnu iskoristivost poboljšavaju:

a) višestupanjska kompresija s međuhlađenjem, čime smanjujemo potrebnu ukupnu snagu za pogon kompresora P_{ik};

b) višestupanjska ekspanzija s međuzagrijavanjem, što povećava ukupnu snagu turbina P_{it};

c) regeneracija topline, tj. uporaba vrućih izlaznih plinova iz posljednje turbine, za zagrijavanje zraka iza kompresora, što smanjuje toplinski tok Φ koji moramo dovoditi.



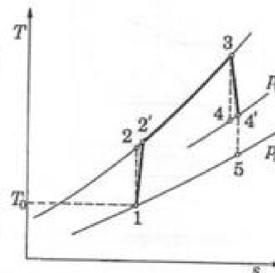
Da bi postrojenje plinske turbine (s otvorenim procesom) postalo što jednostavnije (a uređaji što manji i jeftiniji) zadovoljavamo se često samo s dva stupnja kompresije i jednim stupnjem ekspanzije.

Na slici su: K_1, K_2 – kompresori, R – hladnjak, E – izmjenjivač topline, C – komora za izgaranje, T – turbina.

Mlazni (reaktivni) motori koji služe za pogon zrakoplova imaju postrojenje s plinskom turbinom otvorenog procesa, a njen učinak ne rabi se samo za obavljanje vanjskoga tehničkog rada na osnovi turbine, već plinovi izgaranja stvaraju potisnu (reaktivnu) silu svojim mlazom na izlazu iz stroja kroz posebnu sapnicu.

Turbina mlaznog motora goni samo kompresor i troši

$$P_{it} = P_{ik}/\eta_m$$



gdje je η_m mehanički stupanj djelovanja stroja u cjelini, a snage turbine i kompresora su:

$$P_{ik} = q_m c_p \, (T_{2'} - T_1)$$

$$P_{it} = q_m' \, c_p' \, (T_3 - T_{4'})$$

Zbog toga iz turbine istječu plinovi koji imaju još znatan pretlak spram okolice, $\Delta p = p_0 - p_a$ i zato imaju za ekspanziju do okolnog tlaka još uvijek na raspolaganju entalpijski (izentropski) pad

$$\Delta h_d = h_{4'} - h_5 = c'_p(T_{4'} - T_5)$$

zbog kojega plinovi istječu kroz izlaznu sapnicu velikom brzinom v

$$v = \varphi \sqrt{2\,\Delta h_d}$$

(φ = faktor brzine, v. str. 235), što daje potisnu silu

$$F = q_m' \, v = q_m' \, \varphi \sqrt{2\,\Delta h_d}.$$

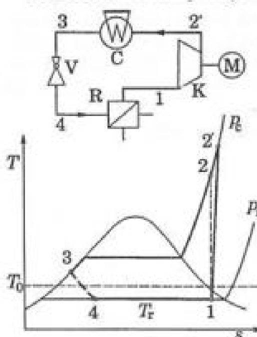
Za vrijeme leta zrakoplova ulazi u mlazni motor zrak pod velikim dinamičkim pritiskom što smanjuje potrebnu snagu kompresora i povećava potisnu silu mlaza.

TOPLINSKE PUMPE

Toplinske su pumpe uređaji kojima crpimo – uz dodavanje energije – toplinu s niže temperature na višu.

Kompresijske toplinske pumpe su strojevi za hlađenje i grijanje. Kružni proces u kompresijskim toplinskim pumpama obavljaju posebno odabrane pare, osobito razni freoni, npr. R12 = difluordiklormetan CF_2Cl_2, R 22 = difluormonoklormetan (CHF_2Cl) itd., nadalje monoklormetan (metilklorid) (CH_3Cl), diklormetan (metilenklorid) (CH_2Cl_2), sumporni dioksid (SO_2), ugljični dioksid (CO_2), amonijak (NH_3) i sl.

Jednostavna kompresijska toplinska pumpa:



K – kompresor, C – kondenzator (za okolicu: zagrijač), V – regulacijski (prigušni) ventil, R – isparivač, refrigerator (za okolicu: hladnjak), M – pogonski motor (električni ili drugi).

Promjene stanja pare:

1-2′: adijabatska kompresija (s trenjem) od tlaka p_r na tlak p_c

2′-3: kondenzacija pri p_c = const (odvođenje topline pri višoj temperaturi u okolicu)

3-4: prigušivanje u regulacijskom ventilu od tlaka p_c na tlak p_r $(h_3 = h_4)$

4-1: isparivanje pri p_r = const (dovođenje topline pri niskoj temperaturi iz okolice).

Snaga za pogon kompresora (stvarna)

$$P = q_m(h_2 - h_1)/\eta = q_m(h_{2'} - h_1)\,\eta_m$$

gdje su: q_m protočna masa pare, h_1 specifična entalpija prije kompresije, h_2 specifična entalpija na koncu izentropske kompresije, h_2' stvarnu specifičnu entalpiju iza kompresora, η_m mehanički stupanj djelovanja, η ukupni stupanj djelovanja.

Odvedeni toplinski tok $\Phi_c = q_m(h_{2'} - h_3)$

Taj toplinski tok može poslužiti za grijanje okolice (»ogrjevni stroj«).

Faktor grijanja $\varepsilon_c = \Phi_c/P$

pokazuje koliko »ogrjevnog toka« Φ_c dobivamo rabeći snagu P za pogon kompresora. Pri malim tlačnim (i temperaturnim) razlikama taj je faktor znatno veći od 1, npr. ε_c = 5 ... 15 (i više).

Dovedeni toplinski tok $\Phi_r = q_m\,(h_1 - h_4)$

Taj toplinski tok služi za hlađenje okolice (»rashladni stroj«).

Rashladni faktor $\varepsilon_r = \Phi_r/P$

pokazuje koliko »rashladnog toka« Φ_r dobivamo rabeći snagu P za pogon kompresora. Pri malim tlačnim (i temperaturnim) razlikama i taj je faktor znatno veći od 1, npr. ε_r = 4 (i manje) do 14 (i više).

*

Apsorpcijske toplinske pumpe služe za apsorpcijske rashladne uređaje. U tu se svrhu iskorištava promjenljiva topivost nekoga rashladnog sredstva u određenom apsorpcijskom sredstvu. Najčešće se rabi amonijak (NH_3) kao rashladno sredstvo, a voda (H_2O) kao apsorpcijsko sredstvo.

Jakost otopine izražavamo omjerom količine amonijaka i cjelokupne otopine

$$\xi = NH_3/(NH_3 + H_2O).$$

Najveću topivost (zasićenje) prikazuje maksimalni omjer ξ_{max}, koji ovisi o tlaku i temperaturi, a iznosi:

ξ_{max} pri tlaku p/bar	pri temperaturi (°C) –20	–10	0	+10	+20	+40	+60	+80	+100
0,2	0,364	0,306	0,253	0,202	0,155	0,068	–	–	–
0,5	0,475	0,406	0,347	0,294	0,244	0,152	0,071	–	–
1,0	0,615	0,512	0,438	0,378	0,325	0,228	0,140	0,062	–
2,0	–	0,701	0,566	0,483	0,418	0,314	0,225	0,141	0,067

Za otapanje je potrebna specifična toplina otapanja r_a, koja je gotovo neovisna o tlaku i temperaturi, ali je ovisna o omjeru ξ:

ξ	0,00	0,25	0,50	0,75
r_a/(kJ/kg)	837	641	209	42

Toplina isparivanja NH_3 (pri +20 °C) iznosi r = 1 189 kJ/kg.

Za otapanje (apsorpciju) amonijaka u vodi odnosno u blagoj (nezasićenoj) otopini (malo ξ) potrebna je znatna toplina $r + r_a$ koju otopina oduzima okolici te ga »hladi«). Apsorpcijom nastaje jaka otopina (veliko ξ) iz koje opet izlučujemo amonijak grijanjem (višoj temepraturi odgovara manje ξ_{max}). Prije ponovnog otapanja moramo amonijak i preostalu blagu otopinu – svaku posebno – ohladiti najprije na temperaturu okolice, da bi nakon apsorpcije postigli temperaturu nižu od okolice.

Za grijanje u apsorpcijskom rashladnom uređaju trošimo znatno više energije nego – pri istom rashladnom učinku – za pogon kompresora u kompresijskoj toplinskoj pumpi.

Rashladne smjese

Sastavine		Sastavni dijelovi (maseni)	Temperatura početna t/°C	konačna t/°C
voda	H_2O	16	+10	–12
amonijev klorid (salmijak)	NH_4Cl	5		
kalijev nitrat (salitra)	KNO_3	5		
voda	H_2O	1	+10	–15
amonijev nitrat	NH_4NO_3	1		

Rashladne smjese (*konac*)

Sastavine		Sastavni dijelovi (maseni)	Temperatura početna $\frac{t}{°C}$	Temperatura konačna $\frac{t}{°C}$
dušična kiselina (razr.) natrijev nitrat (čilska sal.)	HNO_3 $NaNO_3$	2 3	+10	-20
sumporna kiselina natrijev sulfat	H_2SO_4 Na_2SO_4	4 5	+10	-20
voda natrijev karbonat (soda) amonijev nitrat	H_2O Na_2CO_3 NH_4NO_3	1 1 1	+10	-22
dušična kiselina (razr.) amonijev nitrat natrijev sulfat	HNO_3 NH_4NO_3 Na_2SO_4	4 5 6	+10	-40
snijeg natrijev klorid (kuh. sol)	H_2O $NaCl$	2 1	0	-20
snijeg kuhinjska sol salmijak	H_2O $NaCl$ NH_4Cl	5 2 1	0	-25
snijeg sumporna kiselina (razr.)	H_2O H_2SO_4	3 2	0	-30
snijeg solna kiselina (razr.)	H_2O HCl	8 5	0	-32
snijeg dušična kiselina (razr.)	H_2O HNO_3	7 4	0	-35
snijeg kalcijev klorid	H_2O $CaCl_2$	4 5	0	-40

Najniža ledišta vodenih otopina (eutektičnih)

5,9 % Na_2CO_3	− 2,1 °C	36,9 % $NaNO_3$	− 18,5 °C
10,9 % KNO_3	− 2,9 °C	22,4 % $NaCl$*	− 21,2 °C
19,7 % KCl	− 11,1 °C	20,6 % $MgCl_2$	− 33,6 °C
18,7 % NH_4Cl	− 15,8 °C	35,5 % K_2CO_3	− 37,1 °C
41,2 % NH_4NO_3	− 17,4 °C	29,9 % $CaCl_2$	− 55,0 °C

* Eutektična vodena otopina NaCl ima (pri 15 °C) gustoću ϱ = 1 170 kg/m³ i specifični toplinski kapacitet c_p (pri temperaturi t):

t/°C	-20	0	+20
c_p/(J(kg K))	3 320	3 341	3 362

Klimatizacija

Svrha klimatizacije je održavanje temperature i vlage zraka u zatvorenoj prostoriji u granicama željenih vrijednosti. Čovjek odaje toplinski tok i izlučuje vlagu koje (po VDI 2078 – 1977) iznose

– pri mirovanju i bez fizičkog rada:

Temperatura zraka t/°C	Odavanje toplinskog toka Φ/W	Izlučivanje vlage g/h
18	125	35
20	120	35
22	120	40
24	115	60
26	115	65

– pri poluteškom radu iznosi odavanje toplinskog toka 270 W.

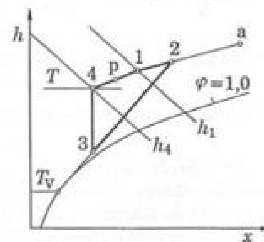
Klimatizacija obuhvaća niz postupaka pri kojima se iz klimatizirane prostorije P izlazeći vlažni zrak (stanja 1) miješa u mješaču M sa svježim zrakom iz atmosfere A (stanja a) u smjesu stanja 2 (koja je ovisna o omjeru miješanja 3:1 ... 6:1); nakon čega će ta smjesa u hladnjaku H (ljetni rad) ili u zagrijaču G_1 i ovlaživaču V (zimski rad) promijeniti svoje stanje do stanja 3, da bi se u dogrijaču G_2 zagrijala do stanja 4, a tada je ventilator Vt tlači u prostoriju P.

Stanje zraka u prostoriji P uzimamo kao točku miješanja p, dobivenu iz stanja ulaznog zraka (4) i stanja izlaznog (1) zraka.

a) *Ljetni pogon*

Vanjski zrak treba hladiti i sušiti. Stoga je uključen hladnjak H, dok su zagrijač G_1 i ovlaživač V isključeni.

U hladnjaku H prelazi toplina sa smjese (stanja 2) na rashladnu vodu (temperature ispod rosišta smjese), pri čemu se smjesa hladi i suši (od stanja 2 do stanja 3), a rashladna se voda zagrijava. Konačno stanje smjese na izlazu iz hladnjaka (stanje 3) ovisno je o njegovoj korisnosti. U dogrijaču G_2 osušena se smjesa zagrije do odgovarajuće temperature T (stanje 4), potom je ventilator Vt tlači u prostoriju P.

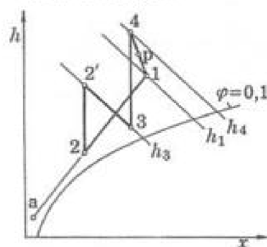


Pri prijelazu q_m kg/s smjese iz stanja 4 u stanje 1 smjesa preuzima iz prostorije

toplinski tok $\Phi = q_m \cdot \Delta h = q_m (h_1 - h_4)$

vlagu $q_{mv} = q_m \cdot \Delta x = q_{mv} (x_1 - x_4)$.

b) *Zimski pogon*



Vanjski zrak valja zagrijati i vlažiti. Stoga su uključeni zagrijač G_1 i ovlaživač V, dok je hladnjak H isključen.

U zagrijaču G_1 zagrijava se smjesa stanja 2 do stanja 2′, u ovlaživaču V se vlaži i hladi do stanja 3. Nakon toga se smjesa dogrijava u dogrijaču G_2 do stanja 4, a tada je ventilator Vt tlači u prostoriju P.

Pri prijelazu q_m kg/s smjese sa stanja 4 u stanje 1 smjesa predaje prostoriji toplinski tok

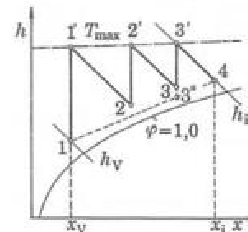
$$\Phi = q_m \cdot \Delta h = q_m (h_4 - h_1)$$

a preuzima od nje vlagu

$$q_{mv} = q_m \cdot \Delta x = q_{mv} (x_1 - x_4).$$

Sušenje vlažne tvari zagrijanim zrakom

Vlažnoj tvari, koja sadrži određenu količinu vode, treba smanjiti tu količinu vode do željene vrijednosti.



Zrak za sušenje (vanjski) neka ima ulaznu vlažnost x_v i ulaznu specifičnu entalpiju h_v (stanje 1). Zagrijavajući ga po izohigri (x = const), do najviše dopuštene temperature T_{max} on prelazi u stanje 1′. Tako zagrijan zrak potom u sušionoj komori prima vlagu koja ishlapljuje iz vlažne tvari te se hladi po izentalpi (h = const) do stanja 2.

Taj se postupak više puta ponavlja (2 – 2′ i 2′ – 3 te 3 – 3′ i 3′ – 4) do izlazne specifične entalpije h_i i izlazne vlažnosti x_i koja treba biti što većom.

Za zagrijavanje q_{mz} kg/s zraka potreban je toplinski tok

$$\Phi = q_{mz} (h_i - h_v)$$

a iz vlažne tvari je zrak preuzeo vlagu

$$q_{mv} = q_{mz} (x_i - x_v).$$

Pri optočnom postupku miješamo izlazni zrak (stanje 4) s ulaznim zrakom (stanje 1) u omjeru koji daje smjesu stanja npr. 3″. Ta se smjesa zagrijava do stanja 3′ i može u sušionici preuzeti vlagu do stanja 4. Optok treba ponavljati do željene suhoće tvari.

ELEKTROTEHNIKA

Simboli

istosmjerna struja	vodič	tri paralelna vodiča
izmjenična struja	križanje vodiča	trokutasti spoj
istosmjerna i izmjenična struja	čvrsti spoj vodiča	zvjezdasti spoj
trofazni sustav	rastavljivi spoj vodiča	ispravljač, elekt. ventil
voltmetar	sklopka	galvanski izvor struje
ampermetar	otpor	istosmjerni generator
vatmetar	promjenljivi otpor	izmjenični generator
ommetar	osigurač	istosmjerni motor
mjerač frekvencije	namot	izmjenični motor
cos φ – mjerač	namot s odvojcima	trošilo struje, rasvjetno tijelo
registrirajući vatmetar	kondenzator	uzemljenje
brojilo	polarizirani kondenzator	spoj s masom

Ohmov zakon definira otpor R kao omjer napona U i struje I

$$R = U/I \qquad U = I\,R \qquad I = U/R\,.$$

Djelatni (ohmski) otpor R upravno je razmjeran s duljinom l i obratno razmjeran s presjekom A vodiča

$$R = \varrho\, l/A \qquad \varrho = R/l \cdot A$$

gdje je ϱ električna otpornost karakteristična za svaku tvar.

Električna otpornost ϱ i presjek A vodiča mjerimo koherentnim jedinicama međunarodnog sustava jedinica (SI): Ω m (= Ω m^2/m) ili izvedenom jedinicom Ω mm^2/m (A u mm^2).

Električna otpornost ϱ ovisi o temperaturi T. Električna otpornost ϱ_1 pri temperaturi T_1 povećava se pri temperaturi T_2 na ϱ_2 po formuli

$$\varrho_2 = \varrho_1\,[1 + \alpha\,(T_2 - T_1)].$$

gdje je: α temperaturni koeficijent električnog otpora mjeren u K^{-1}.

Koeficijent α također se mijenja s temperaturom, no te su promjene pri praktički važnim temperaturama tako neznatne da ga često možemo smatrati konstantnim. Električna otpornost ϱ_1 i temperaturni koeficijenti α određuju se obično pri temperaturi t_1 = 20 °C, a predočeni su za najvažnije tvari na str. 291.

Električna vodljivost G je veličina recipročna električnom otporu R

$$G = 1/R = A/(\varrho\, l)$$

Električna provodnost je $\gamma = 1/\varrho$.

Kirchhoffovi zakoni

Prvi Kirchhoffov zakon. Zbroj struja koje dolaze u neku točku električne mreže jednak je zbroju struja koje iz te točke odlaze, tj. zbroj svih struja jednak je ništici

$$\sum_{i=1}^{n} I_i = 0\,.$$

Drugi Kirchhoffov zakon. U svakom je zatvorenom krugu zbroj narinutih napona jednak zbroju umnožaka struja i pripadnih otpora, tj. zbroju padova napona

$$\sum_{i=1}^{n} U_i = \sum_{i=1}^{n} (I\,R)_i\,.$$

Snaga i rad istosmjerne struje

Snaga P istosmjerne struje jednaka je umnošku napona U i struje I

$$P = U\,I = I^2 R = U^2/R\,.$$

Rad W istosmjerne struje jednak je umnošku snage P i vremena t

$$W = Pt = U\,I\,t = I^2 R\,t$$

Svojstva nekih tvari pri temperaturi od 20 °C

Tvar		Električna otpornost [1] ϱ / μΩ m	Električna provodnost [2] γ / MS/m	Temperaturni koeficijent otpora α / K^{-1}
aluminij	– lijevani	0,040	25	0,003 6
	– mekani	0,028	36	0,004 0
	– tvrdo vučeni	0,029	34,5	0,004 1
bakar	– mekani	0,017 5	57	0,003 93
	– tvrdo vučeni	0,017 8	56	0,003 92
bronca	– aluminijska	0,13 ... 0,29	7,7 ... 3,4	0,000 6 ... 0,001
	– kositrena	0,027 8	36	0,004 0
cekas		1,12	0,894	0,000 14
cekas I		0,97	1,03	0,000 52
cekas II		1,08	0,925	0,000 08
cink		0,060	16,8	0,004 1
čelik		0,1 ... 0,25	10 ... 4	0,004 5 ... 0,005 5
	– lijevani	0,142	7	–
	– lim	0,13	7,7	0,004 5
	– »dinamo« lim	0,27 ... 0,67	3,7 ... 1,5	–
	– žica	0,17	5,9	0,005 2
kantal		1,45	0,69	0,000 06
konstantan		0,5	2,0	– 0,000 05
kositar		0,12	8,3	0,004 5
magnezij		0,043	23	0,004 1
manganin		0,43	2,32	0,000 01
mjed	– lijevana	0,071	14	–
	– vučena	0,07 ... 0,08	14 ... 12,5	0,001 3 ... 0,001 9
nikal		0,42	2,38	0,000 2
nikelin		0,09	11	0,005 5
novo srebro		0,38	2,63	0,000 07
olovo		0,21	4,8	0,004 1
platina		0,10	10	0,003 92
silumin	– lijevani	0,059	17	0,004
sivi lijev		0,6 ... 1,6	1,7 ... 6,3	–
srebro		0,016 5	61	0,004 0
volfram		0,055	18,1	0,004 8
zlato		0,023	43,5	0,004 0
željezo (čisto)		0,10	10	0,006
živa		0,958	1,04	0,000 99

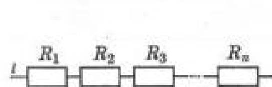
Električna otpornost za destiliranu vodu $\varrho \approx 10^4\,\Omega$ m ($\approx 10^{10}\,\Omega$ mm^2/m).
Električna otprnost za morsku vodu $\varrho = 0{,}3\,\Omega$ m ($= 3 \cdot 10^5\,\Omega$ mm^2/m).

[1] Stariji naziv: specifični otpor i jedinica $\dfrac{\Omega\,\text{mm}^2}{\text{m}}$ (= μΩ m) .

[2] Stariji naziv: specifična vodljivost i jedinica $\dfrac{\text{S m}}{\text{mm}^2}$ (= MS/m) .

Spajanje djelatnih (omskih) otpora

a) Serijski spojeni otpornici pojedinačnih otpora R_i imaju ukupan otpor R jednak zbroju pojedinačnih otpora (koji je veći od najvećeg otpora)

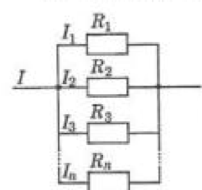


$$R = \sum_{i=1}^{n} R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

te propuštaju struju I_i jednaku u svim otpornicima

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n .$$

b) Paralelno spojeni otpornici pojedinačnih otpora R_i imaju ukupan otpor R koji je recipročna vrijednost zbroja recipročnih vrijednosti svih otpora (manji je od najmanjega otpora), a dobiva se iz jednadžbe

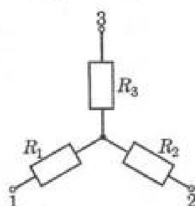


$$1/R = \sum_{i=1}^{n} 1/R_i = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n .$$

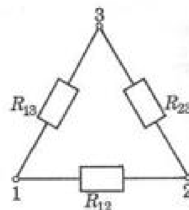
Ukupna struja I jednaka je zbroju struja I_i kroz pojedine otpornike

$$I = \sum_{i=1}^{n} I_i = I_1 + I_2 + \dots + I_n .$$

c) Električni spoj triju otpora



Zvjezdasti spoj (Y,T)



Trokutasti spoj (Δ, Π)

Otpor među stezaljkama

1 – 2	$R = R_1 + R_2$	$R = R_{12}(R_{23} + R_{13})/(R_{12} + R_{23} + R_{13})$
2 – 3	$R = R_2 + R_3$	$R = R_{23}(R_{13} + R_{21})/(R_{12} + R_{23} + R_{13})$
3 – 1	$R = R_3 + R_1$	$R = R_{13}(R_{12} + R_{23})/(R_{12} + R_{23} + R_{13})$

Transformacija zvjezdastog u trokutasti spoj i suprotno

$R_{12} = (R_1R_2)/R_y$ $\qquad R_1 = (R_{12}R_{31})/R_\Delta$

$R_{23} = (R_2R_3)/R_y$ $\qquad R_2 = (R_{12}R_{23})/R_\Delta$

$R_{31} = (R_3R_1)/R_y$ $\qquad R_3 = (R_{23}R_{31})/R_\Delta$

$R_y = R_1R_2R_3/(R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1)$ $\qquad R_\Delta = R_{12} + R_{23} + R_{31}.$

Mjerenje temperature otporom

Termometri na otpor rabe ovisnost djelatnog otpora $\varrho(T)$ o temperaturi T (v. str. 290)



$$\varrho(T) = \varrho_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$

gdje su: ϱ_0 električna otpornost T_0 = 273 K, t_0 = 0 °C, $(T - T_0)$ je temperaturna razlika. Za temperaturnu je razliku °C = K.

Naročito je pogodna za termometre na otpor platina. Otpor $R(t)$ nekog otpornika proizvoljne temperature unutar određenog temperaturnog raspona računa se prema jednadžbi

$$R(t) = R_0 (1 + At + Bt^2)$$

gdje su: t temperatura mjerenog otpora u °C, a A i B temperaturno ovisni koeficijenti, normirani npr. po DIN IEC:

$$A = 0{,}390\,784\,076 \cdot 10^{-2} \quad K^{-1}$$

$$B = 0{,}578\,408\,40 \cdot 10^{-6} \quad K^{-1}.$$

Termonaponi

Termoelektrični se naponi pojavljuju na lemljenim mjestima dviju kovina ili slitina. Oni rastu s porastom temperature, i to se rabi za njezino mjerenje.



Termoelektrični naponski niz (s obzirom na platinu) za temperaturnu razliku među lemljenim mjestima 100 K (100 °C i 0 °C):

Kovina (slitina)	Termonapon mV	Kovina (slitina)	Termonapon mV
Bi	–7,7	Ir	+0,67
konstantan	– 3,47 ... – 3,04	Ag	+0,67 ... +0,79
Ni	– 1,94 ... – 1,20	Cu	+ 0,72 ... +0,77
Pt	0	Au	+0,56 ... +0,80
platinrodij (10% Rh)	+0,65	Fe	+1,88
		kromnikal	+2,20
W	+0,65 ... +0,90		

Termoelektrični naponi u mV pri temperaturi t za različite kovinske parove s obzirom na referentne temperature 0 i 20 °C

Temperatura	Željezo – konstantan		Kromnikal – nikal		Platinrodij – platina	
$\frac{t}{°C}$	0 °C	20 °C	0 °C	20 °C	0 °C	20 °C
– 200	– 8,15	– 9,20				
– 150	– 6,60	– 7,65				
– 100	– 4,75	– 5,80				
– 50	– 2,51	– 3,56				
0	0,00	– 1,05	0,00	– 0,80	0,000	– 0,113
50	2,65	1,60	2,02	1,22	0,299	0,186
100	5,37	4,32	4,10	3,30	0,643	0,530
150	8,15	7,10	6,13	5,33	1,025	0,912
200	10,95	9,90	8,13	7,33	1,436	1,323
250	13,75	12,70	10,16	9,36	1,868	1,755
300	16,56	15,51	12,21	11,41	2,316	2,203
350	19,36	18,31	14,29	13,49	2,778	2,665
400	22,16	21,11	16,40	15,60	3,251	3,138
450	25,00	23,95	18,51	17,71	3,732	3,619
500	27,85	26,80	20,65	19,85	4,221	4,108
550	30,75	29,70	22,78	21,98	4,718	4,605
600	33,67	32,62	24,91	24,11	5,224	5,111
650	36,64	35,59	27,03	26,23	5,738	5,625
700	39,72	38,67	29,14	28,34	6,260	6,147
750	42,92	41,87	31,23	30,43	6,790	6,677
800	46,22	45,17	33,30	32,50	7,329	7,216
850	49,63	48,58	35,34	34,54	7,876	7,763
900	53,14	52,09	37,36	36,56	8,432	8,319
950			39,35	38,55	8,997	8,884
1 000			41,31	40,51	9,570	9,457
1 050			43,25	42,45	10,152	10,039
1 100			45,16	44,36	10,741	10,628
1 150			47,04	46,24	11,336	11,223
1 200			48,89	48,09	11,935	11,822
1 250			50,69	49,89	12,536	12,423
1 300			52,46	51,66	13,138	13,025
1 350					13,738	13,625
1 400					14,337	14,224
1 450					14,935	14,822
1 500					15,054	14,941

Faradayevi zakoni

Faradayeva konstanta F je umnožak:

Avogadrove konstante $N_A = 6{,}022\,136 \cdot 10^{23}\,\text{mol}^{-1}$ i

osnovnog električnog naboja $e = 1{,}602\,177\,33 \cdot 10^{-19}\,\text{A s}$

$$F = N_A e = 96\,485{,}309\ \text{A s mol}^{-1}.$$

Elektrokemijski ekvivalent a određen je molarnom masom M i valencijom v elementa te Faradayevom konstantom F

$$a = M/F\,v \qquad [a] = \text{kg/(A s)}.$$

Vrijednosti elektrokemijskog ekvivalenta a (mg/A s = 10^{-6} kg/A s) **nekih tvari**

Tvar [1]		$\frac{a}{\text{mg/A s}}$	Tvar [1]		$\frac{a}{\text{mg/A s}}$
aluminij		0,093 2	olovo		1,073 5
bakar	– jednovalentni	0,658 8	platina		0,505 7
	– dvovalentni	0,329 4	srebro		1,118 0
cink		0,338 7	zlato		0,681 2
kalij		0,405 2	željezo	– dvovalentno	0,289 3
kositar	– dvovalentni	0,615 1		– trovalentno	0,192 9
	– četverovalentni	0,307 5	živa	– jednovalentna	2,078 9
magnezij		0,126 0		– dvovalentna	1,039 5
natrij		0,238 4			
nikal	– dvovalentni	0,304 1	kisik (anion)		0,082 9
	– trovalentni	0,202 7	vodik (kation)		0,010 44

Prvi Faradayev zakon. Struja I koja protječe elektrolitom izlučit će na elektrodi u vremenu t masu m

$$m = a\,I\,t$$

gdje je a elektrokemijski ekvivalent.

Drugi Faradayev zakon. Mase m_1 i m_2 različitih tvari, izlučene istom strujom u istom vremenu, odnose se međusobno kao kvocijenti relativnih atomnih masa A i kemijskih valencija v tih tvari

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{A_1/v_1}{A_2/v_2}.$$

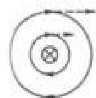
[1] Valencija se odnosi na vezu kovine u kemijskom spoju.

MAGNETNO I ELEKTRIČNO POLJE

Magnetno polje nastaje oko polova permanentnih magneta ili oko vodiča električne struje.

Jakost magnetnog polja H (A/m) najlakše određujemo mjerenjem električne struje I

- na okomitoj udaljenosti r od beskonačno dugog vodiča $H = I/2\pi r$
- u sredini kružnog vodiča (= 1 zavoj) promjera d $H = I/d$
- u sredini svitka sa w zavoja na cilindru promjera d $H = I\,w/d$
- u sredini svitka sa w zavoja na zatvorenom (npr. kružnom) prstenu (obodne) duljine l $H = I\,w/l$.



Smjer magnetnog polja određuje se »pravilom desnog vijka«: podudara li se smjer aksijalnog pomicanja vijka sa smjerom struje u vodiču, magnetno će polje imati smjer okretanja vijka. (Znak ⊗ je gledanje u smjeru struje, a znak ⊙ je gledanje suprotno smjeru struje. Na slici struja ulazi okomito u ravninu crteža.)

Gustoća magnetnog toka (magnetna indukcija) B (T = V s/m²) je kvocijent magnetnog toka Φ (V s) i ploštine A (m²), u različitim tvarima izazvan magnetnim poljem jakosti H

$$B = \Phi/A = \mu H = \mu_0 \mu_r H$$

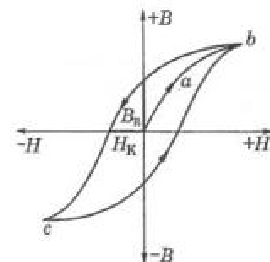
gdje su: A presjek, μ permeabilnost, μ_0 permeabilnost praznog prostora (vakuuma), μ_r relativna permeabilnost.

Permeabilnost praznog prostora μ_0 je konstanta

$$\mu_0 = 1{,}256\ 637 \cdot 10^{-6}\ \text{V s/(A m)}.$$

Relativna permeabilnost μ_r (bezdimenzijski broj) ovisi o vrsti tvari i jakosti magnetnog polja H.

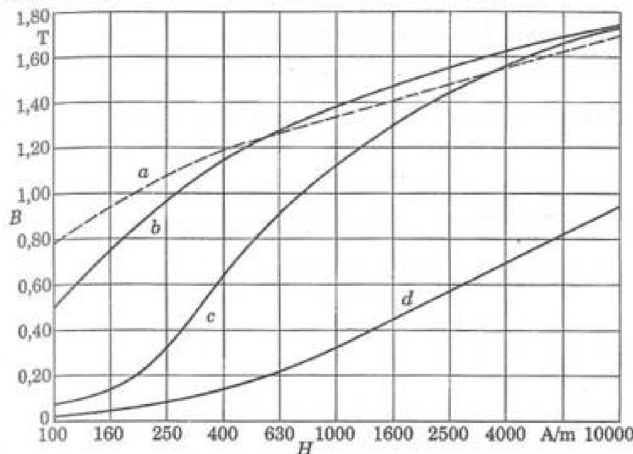
U vakuumu (a to vrijedi i za zrak) relativna je permeabilnost $\mu_r = 1$. Za feromagnetne tvari prikazujemo ovisnost gustoće magnetnog toka o jakosti magnetnog polja »krivuljom magnetiziranja« $B = f(H)$.



Prvo magnetiziranje čelika predočuje početna (»djevičanska«) krivulja a. Smanjimo li zatim jakost magnetnog polja do ništice, ostat će u čeliku remanentni magnetizam B_R, koji se poništava samo suprotnim magnetnim poljem jakosti H_K *(koercitivna sila)*.

Magnetiziranjem čelika do zasićenja u jednom b i drugom smjeru c krivulja magnetiziranja opisuje *histereznu petlju*.

Čelici za permanentne magnete (magnetni tvrdi čelici) imaju vrlo široku histereznu petlju. Čelici pogodni za izmjenične magnete (magnetni meki čelici) imaju vrlo (praktički zanemarivo) usku histereznu petlju.



Krivulja magnetiziranja $B = f(H)$ za meki čelik i sivi lijev
a – transformatorski lim, b – dinamo lim, c – čelični lijev, d – sivi lijev

Nosivost magneta

Na nosivim polovima magneta magnetne indukcije B i presjeka A nosivost magneta F je

$$F = B^2 A/(2\mu_0).$$

Induktivnost

Induktivnost L nekog svitka sa w zavoja predočuje se kvocijentom promjene magnetnog toka Φ i struje I koja je stvara

$$L = w\ \mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}I .$$

Svitak za w zavoja kojemu je presjek A i duljina l ima induktivnost L

$$L = \mu_0 \mu_r w^2 A/l .$$

Induktivnost svitka bez željezne jezgre (za zrak: $\mu_r = 1$) je dakle stalna. Induktivnost svitka sa željeznom jezgrom ovisna je o nagibu krivulje magnetiziranja ($\mu_0\mu_r = B/H$).

Energija svitka je

$$W_L = L\,I^2/2 .$$

Električno polje nastaje između međusobno izoliranih vodiča pod naponom (i općenito: oko svakog statičkog električnog naboja).

Jakost električnog polja E (V/m) između dviju paralelnih ploča, među kojima je napon U a njihova udaljenost a, jest

$$E = \frac{U}{a}.$$

Na ploči s nabojem Q (C), i ploštine A (m^2) *gustoća naboja* D (C/m^2) je:

$$D = \frac{Q}{A} = \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$$

gdje su: ε dielektričnost, ε_0 dielektrična konstanta (dielektričnost vakuuma) i ε_r relativna dielektričnost izolatora.

Dielektrična konstanta praznog prostora ε_0 je

$$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{A\ s/(V\ m)}.$$

Relativna dielektričnost izolatora ε_r zavisi od tvari (između ploča) i za prazni prostor (vakuum) je $\varepsilon_r = 1$, a za zrak $\varepsilon_r = 1{,}006$. Vrijednosti za razne izolatore predočene su u sljedećoj tablici.

Električna otpornost, relativna dielektričnost i probojna čvrstoća električnih izolatora

Tvar	Električna otpornost $\frac{\varrho}{\Omega\ m}$	Relativna dielektričnost ε_r	Probojna čvrstoća kV/mm	Dopuštena maksimalna temperatura $\frac{t}{°C}$
asfalt	–	2,7	1,8 ... 15,8	100
bakelit	10^{10}	2,8	20	55 ... 100
guma				
– mekana	–	2,7 ... 7	10 ... 30	– 30 ... +60
– tvrda	10^{16}	3 ... 3,5	10 ... 30	– 40 ... +80
kremen	$5 \cdot 10^{16}$	4 ... 4,8	35 ... 40	1 050
mikanit	–	4,5 ... 5,5	20 ... 30	–
mramor	–	7 ... 9	1,4 ... 2,8	650
parafin	10^{14} ... 10^{16}	2 ... 2,3	8 ... 20	–
poliviniklorid				
– elastični	10^{11}	3 ... 4	50	65
– tvrdi	10^{14}	3 ... 4	50	60 ... 70
porculan	10^{9} ... 10^{12}	5 ... 6,3	30 ... 38	–
staklo	$5 \cdot 10^{7}$	4 ... 17	12 ... 20	–
šelak	10^{14}	2,9 ... 3,7	–	75
škriljevac	10^{6} ... 10^{12}	6 ... 10	0,2 ... 0,4	–
tinjac	10^{13} ... 10^{15}	6 ... 8	20 ... 60	–
tvrda ljepenka	10^{8} ... 10^{10}	5 ... 6	10 ... 30	130
ulje (transformatorsko)	10^{10}	2 ... 2,5	8 ... 12	85

Električni kapacitet

Kapacitetom C određujemo kvocijent električnog naboja Q, skupljenog na dvjema elektrodama kondenzatora, i napona U između njih

$$C = Q/U.$$

Kondenzator ploštine ploče A, jedne od istih paralelnih ploča koje su između sebe udaljene za a (samo toliko da je električno polje homogeno), je kapaciteta C

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A/a.$$

Kapacitet kondenzatora ovisi o relativnoj dielektričnosti ε_r tvari između ploča (izolatora).

Spoj više kondenzatora

a) u paralelnom spoju (povećava se ploština ploča); ukupni je kapacitet C

$$C = \sum_{i=1}^{n} C_i = C_1 + C_2 + \ldots + C_n$$

b) u serijskom spoju (povećava se razmak ploča) ukupni je kapacitet C

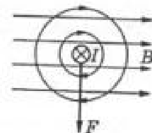
$$1/C = \sum_{i=1}^{n} 1/C_i = 1/C_1 + 1/C_2 + \ldots + 1/C_n.$$

Energija kondenzatora $W_C = CU^2/2.$

Vodič električne struje u magnetnom polju

1. Sila F (N) koja djeluje na vodič električne struje jakosti I (A) u magnetnom polju gustoće B (T) na duljini l (m) je

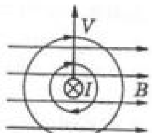
$$F = B\,I\,l.$$



Sila F je usmjerena prema manjoj gustoći magnetnog polja, koje se tvori iz magnetnog polja gustoće B i magnetnog polja, a nastaje oko vodiča struje jakosti I. Ta se sila F rabi u elektromotorima.

2. U vodiču duljine l (m) koji se giba brzinom v (m/s) magnetnim poljem gustoće B (T) inducira se napon U_i (V)

$$U_i = B\,v\,l.$$



Inducirani napon U_i uzrokuje struju takvoga smjera da se vodič giba brzinom v prema većoj gustoći magnetnog polja a koje se tvori iz magnetnog polja gustoće B i magnetnog polja nastalog oko vodiča struje jakosti I.

Ako se magnetni tok Φ mijenja u vremenu t, u svitku sa w mirujućeg zavoja inducirat će se napon U_i, na kojem se temelji djelovanje električnih generatora

$$U_i = -w\,(\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t).$$

IZMJENIČNA STRUJA

Izmjenični napon, koji nastaje u vodičima električnih generatora, izaziva u zatvorenom strujnom krugu izmjeničnu struju određene frekvencije.

Frekvencija f izmjenične struje ovisi o broju pari polova p i brzini vrtnje n generatora

$$f = p\,n.$$

Normalna je frekvencija izmjenične struje u Europi f = 50 Hz. Njoj odgovaraju brojevi pari polova p i najviše rabljene brzine vrtnje n:

Broj pari polova	Broj polova	Brzina vrtnje n		Broj pari polova	Broj polova	Brzina vrtnje n	
p	$2p$	$\frac{n}{s^{-1}}$	$\frac{n}{min^{-1}}$	p	$2p$	$\frac{n}{s^{-1}}$	$\frac{n}{min^{-1}}$
1	2	50	3 000	8	16	6,25	375
2	4	25	1 500	10	20	5	300
3	6	16⅔	1 000	12	24	4⅙	2 250
4	8	12,5	750	16	32	3,125	187,5
5	10	10	600	20	40	2,5	150
6	12	8⅓	500	24	48	2 1/12	125

Kružna frekvencija (pulsacija): $\omega = 2\pi f$.

Otpor za izmjeničnu struju

Cjelokupni (prividni) otpor Z (impedancija) je: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, gdje su R djelatni (omski otpor), a X jalovi otpor (reaktancija).

Djelatni otpor za izmjeničnu struju – zbog potiskivanja (skin efekta) – nije jednak djelatnom otporu za istosmjernu struju (v. str. 290). Pri niskim frekvencijama ta je razlika neznatna.

Jalovi je otpor $X = \omega L - 1/\omega C = X_L - X_C$

gdje su: induktivni otpor (induktancija) $X_L = \omega L$

kapacitivni otpor (kapacitancija) $X_C = 1/(\omega C)$.

Spoj više jalovih otpora:

a) u serijskom spoju $X = \sum_{i=1}^{n} X_i$

$X_L = X_{L1} + X_{L2} + \ldots + X_{Ln}$ $\quad X_C = X_{C1} + X_{C2} + \ldots + X_{Cn}$

b) u paralelnom spoju $1/X = \sum_{i=1}^{n} 1/X_i$

$1/X_L = 1/X_{L1} + 1/X_{L2} + \ldots + 1/X_{Ln}$ $\quad 1/X_C = 1/X_{C1} + 1/X_{C2} + \ldots + 1/X_{Cn}$

Kut faznog pomaka φ između struje i napona dobije se iz

$$\varphi = \text{arc tan}\, X/R = (X_L - X_C)/R .$$

Ako je $X_L > X_C$, struja vremenski zaostaje za naponom; ako je $X_L < X_C$, struja prethodi naponu za kut φ.

Jednofazni sustav

Struja I — $I = U/Z = U/\sqrt{R^2 + X^2}$

Snaga P – prividna snaga — $P_S = U\,I$

djelatna snaga — $P = U\,I \cos\varphi$

jalova snaga — $P_Q = U\,I \sin\varphi$

faktor snage — $\cos\varphi = P/P_S = P/U\,I$

Rad W — $W = P\,t = U\,I\,t \cos\varphi$

Trofazni sustav

Trofazni sustav izmjenične struje ima tri napona kojima su faze međusobno pomaknute za kut $2\pi/3$ (= 120°).

Linijski napon U

Linijska struja I

Zvjezdasti spoj

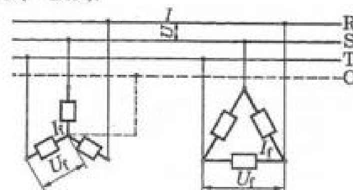
fazni napon $U_f = U/\sqrt{3}$

fazna struja $I_f = I$

Trokutasti spoj

fazni napon $U_f = U$

fazna struja $I_f = I/\sqrt{3}$



Zvjezdasti spoj — Trokutasti spoj

Snaga P – prividna snaga — $P_S = 3\,U_f\,I_f = \sqrt{3} \cdot U\,I$

djelatna snaga — $P = \sqrt{3} \cdot U\,I \cos\varphi$

jalova snaga — $P_Q = \sqrt{3} \cdot U\,I \sin\varphi$

Rad W — $W = P\,t = \sqrt{3} \cdot U\,I\,t \cos\varphi$

Pri računanju snage P i rada W faktor snage $\cos\varphi$ odnosi se na fazne vrijednosti U_f i I_f.

Transformacija izmjenične struje

Inducirani naponi U_i u primarnom i sekundarnom namotu transformatora odnose se kao njihovi brojevi zavoja w

$$U_{i1}/U_{i2} = w_1/w_2.$$

Napon U_2 na stezaljkama sekundarnog namota zbog gubitaka je manji

$$U_2 < U_1\,(w_2/w_1) .$$

Korisnost transformatora η, tj. omjer snage $P_2 = U_2\,I_2$ (VA) sekundarne strane i snage $P_1 = U_1\,I_1$ (VA) primarne strane, razmjerno je dobra (transformatori nemaju gibljivih dijelova):

za malene snage (npr. 1 kVA) $\eta = 0{,}92$

za velike snage (npr. 1000 kVA) $\eta = 0{,}985$.

ELEKTRIČNO GRIJANJE

Jouleova toplina Q (J) je toplina koja se razvija u vodiču otpora R (Ω) kojim teče struja I (A) u vremenu t (s)

$$Q = I^2 R\, t.$$

Za električno se grijanje najviše rabe sljedeće tvari:

a) za radne temperatuare 800 ... 1 100 °C
slitine željeza, nikla i kroma (cekas, nikrom itd.) – za kuhala, peći, industrijske peći;

b) za radne temperataure do 1 350 °C
slitine željeza, kroma, aluminija i kobalta (cekas ekstra, kantal itd.) – za peći za žarenje, taljenje i temperiranje te peći u atmosferi sumpornih i drugih plinova;

c) za radne temeprature do 1 450 °C
karborundni štapovi (silit, silikarabon do 1 400 °C, kvarcilit do 1 450 °C drugi) – za peći keramičke industrije, peći za taljenje, laboratorijske peći itd.;

d) za radne temperature do 1 700 °C
rodij, molibden, volfram (Mo i W u redukcijskoj atmosferi!) – za laboratorijske peći;

e) za radne temperature do 2 300 °C
elektrografit – za elektrode električnih peći itd.

Osnovni podatci češće rabljenih otporničkih tvari za grijanje

Tvar [1]	Električna otpornost [2] $\frac{\varrho}{\mu\Omega\ \mathrm{m}}$	Temperaturni koeficijent otpora $\frac{\alpha}{\mathrm{K}^{-1}}$	Maksimalna radna temperatura $\frac{t_{max}}{°\mathrm{C}}$	Talište $\frac{t_t}{°\mathrm{C}}$
cekas	1,08	0,000 25	930	1 370
cekas I	0,97	0,000 52	–	–
cekas II	1,06	–	1 100	1 400
cekas ekstra	1,40	0,000 05	1 300	1 500
nikrom	1,12	0,000 17	930	1 350
nikrom V	1,08	0,000 09	1 100	1 400
kantal A	1,35	0,000 08	1 300	1 530
kantal A_1	1,45	0,000 06	1 350	1 530
omaks	1,66	0,000 035	–	1 500

[1] Trgovački naziv.
[2] Stariji naziv specifični otpor i jedinica Ω mm²/m (= μΩ m).

Toplina q (J/s mm²) koju otpornička žica za grijanje predaje u jedinici vremena iz jedne ploštine pri različitim temperaturama žice, približno je:

Temperatura žice $\frac{t}{°\mathrm{C}}$	Toplina $\frac{q}{\mathrm{J/(s\ mm^2)}}$	Temperatura žice $\frac{t}{°\mathrm{C}}$	Toplina $\frac{q}{\mathrm{J/(s\ mm^2)}}$
700 ... 800	0,02	1 000	0,006 ... 0,008
900	0,01	1 100	0,004 ... 0,006

Dopuštene opteretivosti okrugle žice cekas II na šamotnoj podlozi pri temperaturi žice približno 800 °C:

Struja $\frac{I^*}{\mathrm{A}}$	Promjer žice $\frac{d}{\mathrm{mm}}$	Duljin. otpor $\frac{R'^*}{\Omega/\mathrm{m}}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{\mathrm{g/m}}$	Struja $\frac{I^*}{\mathrm{A}}$	Promjer žice $\frac{d}{\mathrm{mm}}$	Duljinski otpor $\frac{R'^*}{\Omega/\mathrm{m}}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{\mathrm{g/m}}$
1,58	0,25	23,60	0,4	8,46	0,90	1,82	5,3
1,95	0,30	16,50	0,6	10,09	1,00	1,48	6,5
2,35	0,35	12,00	0,8	12,10	1,10	1,22	7,8
2,80	0,40	9,25	1,0	13,81	1,20	1,02	9,3
3,44	0,45	7,30	1,3	15,51	1,30	0,87	11,0
3,99	0,50	5,90	1,6	17,21	1,40	0,76	12,8
4,52	0,55	4,88	2,0	18,90	1,50	0,65	14,7
5,06	0,60	4,10	2,3	21,08	1,60	0,58	16,7
5,60	0,65	3,50	2,7	25,08	1,80	0,45	21,0
6,16	0,70	3,10	3,2	29,21	2,00	0,37	26,1
6,76	0,75	2,62	3,7				
7,29	0,80	2,31	4,2				

* Pri 800 °C.

Proračun peći

Za traženu snagu električnih grijalica P uz napon U određuje se struja

$$I = \frac{P}{U}.$$

Za struju I odabere se iz tablice odgovarajući promjer žice i njezin otpor R' za duljinu žice 1 m (Ω/m).

Iz ukupno potrebnog otpora R (Ω)

$$R = \frac{U^2}{P}$$

izračuna se potrebna duljina odabrane žice l (m)

$$l = \frac{R}{R'}.$$

Svjetlosni tok Φ (lm) je ukupna količina svjetlosti koju rasvjetno tijelo odašilje u svim pravcima.

Svjetlosna jakost I_v (cd) je kvocijent svjetlosnog toka Φ i prostornog kuta ω

$$I = \Phi/\omega\ .$$

Prostorni kut ω je dio koji obuhvaća plašt isječka kugle polumjera r ako je A površina osnovne ploštine isječka

$$\omega = A/r^2.$$

Osvjetljenje (iluminancija) E (lx) je gustoća svjetlosnog toka Φ kojom izvor svjetlosti osvjetljuje ploštinu A

$$E = \Phi/A = I/r^2.$$

Osvjetljenje se smanjuje s kvadratom udaljenosti od izvora svjetlosti. *Svjetljivost* (luminancija) B (cd/m^2) je svjetlosna jakost I_v (cd) koju svjetlost isijava iz svoje površine.

Nuždno osvjetljenje E (lx) prostora

Vrsta rada	Opće osvjetljenje		Lokalno i opće osvjetljenje		
	osrednje	na najnepovoljnijem mjestu	radnog mjesta	opće: osrednje	opće: na najnepovoljnijem mjestu
grubi	20 ... 40	10	50 ... 100	20	10
osrednji	40 ... 80	20	100 ... 300	30	15
precizan	75 ... 150	50	300 ... 1 000	40	20
vrlo precizan	150 ... 300	100	1 000 ... 5 000	50	30

Vrste rada:

grubi	lijevanje, kovanje, zemljani radovi i sl.
osrednji	normalni rad na alatnim strojevima, zidanje i sl.
precizni	precizni rad na strojevima, montaža, čitanje, pisanje i sl.
vrlo precizni	precizna mehanika, rezbarenje, risanje i sl.

Nuždan svjetlosni tok Φ za osvjetljenje ploštine A osvjetljenjem E

$$\Phi = E\,A/\eta$$

gdje je korisnost električne rasvjete η ovisna o vrsti i položaju rasvjetnog tijela i o obliku i boji zidova i stropova (veća je pri svjetlijim zidovima):

izravna rasvjeta $\eta = 0,40 \ldots 0,55$

neizravna rasvjeta $\eta = 0,15 \ldots 0,35$.

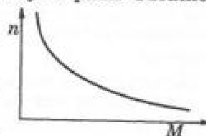
Svjetlosni tok Φ žarulje s kovinskom niti snage P (pri 220 V)

P/W	15	25	40	60	100	200	300	500	1 000	1500	2 000
Φ/lm	112	194	322	555	1 070	2 500	4 070	7 550	17 100	27 500	42 000
(Φ/P)/(lm/W)	7,5	7,8	8,1	9,3	10,7	12,5	13,6	15,1	17,1	18,3	21,0

Motori istosmjerne struje

1. *Serijski motori* (imaju uzbudni namot vezan u seriji s rotorskim namotom).

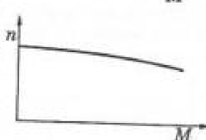
Serijski motori imaju »mekanu karakteristiku«. Pri porastu opterećenja raste moment M na osovini, a brzina vrtnje n pada. Obratno: rasterećeni motor teži »bijegu«.



Pokretni je moment M_a znatno veći od nazivnoga (300 % i više).

Uporaba: električna vuča (električne željeznice, tramvaj, trolejbus), dizala itd.

2. *Paralelni motori* (imaju uzbudni namot vezan paralelno rotorskom namotu).



Paralelni motori imaju »tvrdu karakteristiku«. Pri opterećenju, tj. pri povećanju momenta M brzina vrtnje n mijenja se samo neznatno.

Pokretni je moment M_a također veći od nazivnoga.

3. *Kompaundni motori* su kombinacija serijskog i paralelnog motora. Rabi se za veće snage (npr. za pogon u valjaonicama).

*

Promjenu smjera vrtnje u motora istosmjerne struje postižemo zamjenom stezaljki uzbudnog ili rotorskog namota.

Brzinu vrtnje istosmjernih motora reguliramo mijenjanjem uzbude (ekonomično) ili otpornikom u seriji rotorskom namotu (neekonomično) ili mijenjanjem priključenog napona.

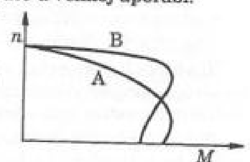
Motori izmjenične struje

1. *Trofazni asinkroni motori* djeluju po načelu okretnog magnetnog polja. Statorski i rotorski namoti međusobno su odvojeni: statorski je vezan na trofaznu mrežu, a rotorski je zatvoren u svomu krugu:

a) *kolutni* asinkroni motor ima rotorski namot spojen preko kliznih koluta na otpore pokretača;

b) *kavezni* asinkroni motor ima rotorski namot u obliku kaveza i kratko spojen. To je najjednostavniji motor i zato u velikoj uporabi.

Trofazni asinkroni motor ima »tvrdu karakteristiku«.



Krivulja A vrijedi za uključene otpore pokretača, krivulja B za kratko spojeni rotor (otpori isključeni).

Pokretni je moment znatan (120 ... 250 % nazivnoga).

Struja pokretanja trofaznih asinkronih motora je vrlo velika. Pri kratko spojenim rotorima (kavezni motori) može se postići osmerostruka vrijednost nazivne struje. Zato se za iole veće jedinice rabi kolutni motor, koji pokrećemo uz uključene otpore (manja struja pokretanja!), a zatim otpore postupno isključujemo. Kod kaveznih motora veće snage struju pokretanja smanjujemo posebnom sklopkom »zvijezda-trokut«.

Brzinu vrtnje možemo regulirati otporima u rotorskom krugu (u kolutnih motora je to neekonomično). Gruba regulacija brzine vrtnje moguća je mijenjanjem broja statorskih polova sklopkom (u kolutnih i kaveznih motora).

Smisao vrtnje mijenjamo međusobnom zamjenom bilo kojih dviju faza na stezaljkama statora.

2. *Trofazni sinkroni motor* ima stator s trofaznim namotom, priključenim na mrežu, i rotor s nizom polova – permanentnih magneta (za manje snage) ili elektromagneta napajanih preko kliznih koluta istosmjernom strujom iz posebnog izvora (za veće snage).

Brzina vrtnje n je konstantna – sinkrona, ovisna samo o frekvenciji mreže, a neovisna o opterećenju (momentu M).

Pri opterećenjima većim od graničnoga (M_{max}) sinkroni motor ispada iz koraka te se zaustavlja.

Sinkroni se motor ne može sam zavrtjeti (osim u posebnoj izvedbi). Treba ga dovesti na sinkronu brzinu (npr. posebnim motorom).

Rabi se gdje je potrebna potpuno konstantna brzina vrtnje, pri znatnijim opterećenjima i za korekciju faznog pomaka.

3. *Jednofazni asinkroni motor* stvara okretno magnetno polje radnim i posebnim pomoćnim namotom statora. Jednofazni motor ima »tvrdu karakteristiku«, a pokretni moment je 30 ... 200 % nazivnoga.

Rabe se kao mali motori u gospodarstvu i kućanstvu.

4. *Kolektorski motor* ima kolektor (komutator) (poput istosmjernih motora) koji omogućuju regulaciju brzine vrtnje u širokim granicama (ali je skuplji od asinkronih motora). Brzina se vrtnje regulira:
- regulacijskim transformatorom priključenim između motora i mreže
- odvojcima na statorskim namotima
- pomicanjem četkica.

Značajke kolektorskih motora slične su značajkama motora istosmjerne struje: serijski kolektorski motor ima »meku karakteristiku«, paralelni kolektorski motor ima »tvrdu karakteristiku«.

Rabe se gdjegod je potrebna regulacija brzine vrtnje u motora izmjenične struje (papirna i tekstilna industrija, dizala, električne željeznice itd.)

Snaga elektromotora

Snaga elektromotora koji iz mreže troši struju jakosti I pri naponu U (linijske vrijednosti, v. str. 301), je za:

istosmjernu struju $P = \eta_{mot}\, U\, I$

jednofazni sustav $P = \eta_{mot}\, U\, I \cos \varphi$

trofazni sustav $P = \eta_{mot}\, \sqrt{3} \cdot U\, I \cos \eta$

Korisnosti elektromotora η_{mot}

Vrsta struje	Za snagu motora P (kW)			
	do 1	2 ... 10	10 ... 50	50 ... 100
istosmjerna, jednofazni sustav	0,65 ... 0,78	0,78 ... 0,86	0,86 ... 0,90	0,90 ... 0,93
trofazni sustav	0,80	0,85 ... 0,88	0,88 ... 0,91	0,91 ... 0,92

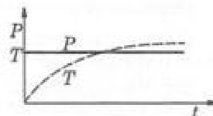
Izbor elektromotora

Pri izboru snage motora za određeni pogon odlučujuće je zagrijavanje motora. Zbog toga možemo motor kratkotrajno opteretiti znatno više od njegove nazivne snage u trajnom pogonu.

Razlikujemo razne vrste pogona motora, od kojih su najznačajnije sljedeće (predočene dijagramima u kojima su: P snaga, T temperatura, t vrijeme):

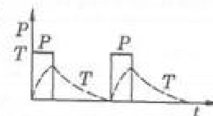
1. *Trajni pogon* (S_1)

Motor radi neprekidno i postiže konačnu stacionarnu temperaturu koja ne smije premašiti dopuštenu najvišu temperaturu.



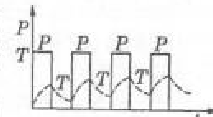
2. *Kratkotrajni pogon* (S_2)

Motor radi kratkotrajno (npr. 10, 30 ili 60 min) tako da za vrijeme rada smije dostići dopuštenu najvišu temperaturu, u mirovanju potpuno se ohladi na temperaturu okolice.



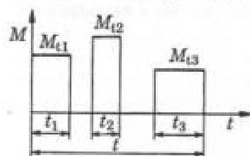
3. *Prekidni pogon* (S_3)

Motor radi u kraćim razdobljima rada i mirovanja tako da smije u radu dostići dopuštenu najvišu temperaturu, ali se za vrijeme prekida ne ohladi na temperaturu okolice.



Obzirom na izvedbu motora (razred izolacije) najviša dopuštena temperatura dostiže vrijednosti: 90, 105, 120, 130, 155, 180 °C (ili i više).

Pri izboru snage motora za neki pogon vrijedi približno



$$M = \sqrt{\sum(M_n^2\, t_n)/t}$$

gdje su: M za izbor motora odlučujući jednolični moment vrtnje u vremenu t, M_n pojedini momenti vrtnje u pojedinim vremenima t_n.

Uz približno iste brzine vrtnje vrijedi to i za snagu P

$$P = \sqrt{\sum(P_n^2\, t_n)/t}.$$

ELEKTRIČNI VODOVI NISKOG NAPONA

Pad napona u u vodu razlika je između napona U_0 na izvoru električne struje i napona U u potrošača

$$u = U_0 - U.$$

Pri presjeku žice A (mm²), duljini voda (ne žice!) l (m), električnoj otpornosti tvari ϱ (μΩ m*) te jakosti struje I (A) odnosno snage električne struje P (W), naponu U (V) i faznom pomaku φ na mjestu potrošnje (za trofazni je sustav U linijski napon, v. str. 301!), pad napona u (V) u vodu niskog napona položenom u cijevi ili kablu bit će za:

istosmjernu struju	$u = (2l/A)\,\varrho\, I = (2l/A)\,\varrho\, P/U$
jednofazni sustav	$u = (2l/A)\,\varrho\, I \cos\varphi = (2l/A)\,\varrho\, P/U$
trofazni sustav	$u = (l/A)\,\varrho\sqrt{3}\cdot I \cos\varphi = (l/A)\,\varrho\, P/U$

Ovim jednadžbama lako izračunamo presjek žice A za određeni dopušteni pad napona u.

Pri niskonaponskim je zračnim vodovima za izmjeničnu struju pad napona u nešto veći zbog dodatnog induktivnog otpora. U tom slučaju valja izračunane vrijednosti za pad napona u pomnožiti faktorom iz tablice:

cos φ	Presjek žice A mm² 10	16	25	35	50	70	95
0,9	1,1	1,15	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8
0,8	1,15	1,24	1,36	1,5	1,7	1,9	2,2
0,7	1,2	1,32	1,5	1,7	1,9	2,2	2,6

Dopušteni pad napona izražen u postotcima nazivnog napona mreže je za:

skupni dovod od uvoda do električnog brojila	< 1 %
rasvjetne instalacije od brojila do kojegod svjetiljke	< 2 %
motorne instalacije od brojila do motora	< 5 %.

* μΩ m = Ω mm²/m.

Zaštita vodova

Vodovi moraju biti zaštićeni od preopterećenja osiguračima (ili sklopkama) da se ne bi prekomjerno ugrijali.

Najveća dopuštena trajna struja u vodičima (= nazivna struja osigurača)

Presjek vodiča A/mm² Cu	Al	Nazivna struja rastalnih osigurača A I	II	III	Presjek vodiča A/mm² Cu	Al	Nazivna struja rastalnih osigurača A I	II	III
0,75	-	-	10	16	25	35	80	100	125
1	-	10	16	20	35	50	100	125	160
1,5	2,5	16	20	25	50	70	125	160	200
2,5	4	20	25	35	70	95	-	200	225
4	6	25	35	50	95	120	-	225	260
6	10	35	50	63	120	150	-	260	300
10	16	50	63	80	150	185	-	300	350
16	25	63	80	100	185	240	-	350	430
					240	-	-	430	500

I: izolirani vodiči istoga strujnog kruga, položeni u izolacijske cijevi;

II: cijevni (oklopljeni) vodiči, kabelski ili višežilni, koji nisu položeni u cijevima, višežilni savitljivi priključni vodovi;

III: jednožilni izolirani vodiči slobodno položeni u zraku, jednožilni spojni vodovi u rasklopnim postrojenjima, goli vodiči presjeka do 50 mm² Cu ili 70 mm² Al.

Sve vrijednosti predočene u tablici vrijede za temperaturu okolice do 25 °C. Pri višim temperaturama valja ove vrijednosti pri vodičima, izoliranim gumom ili termoplastom, odgovarajuće sniziti (pri 40 °C za 25 odnosno 18 %, pri 55 °C za 62 odnosno 42 %).

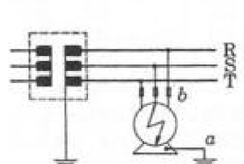
Zaštitne mjere u niskonaponskim postrojenjima

Oštećenjem električnih strojeva i naprava mogu vanjski dijelovi postrojenja doći pod napon i tako dodirom dovesti u opasnost radno osoblje. Po propisima HRN o postrojenjima s naponom do 65 V prema zemlji nisu potrebne zaštitne mjere osim pri ručnim svjetiljkama i drugim električnim napravama u kotlovima i sličnim tijesnim prostorima. U postrojenjima s naponom od 65 do 250 V prema zemlji zaštitne su mjere potrebne tamo gdje je prijelazni otpor čovjeka prema zemlji smanjen uslijed vlage, topline i kemijskih utjecaja, u prostorijama s kamenim ili betonskim podom, pri kovinskim konstrukcijama itd. Za napone preko 250 V potrebne su zaštitne mjere u svakom slučaju.

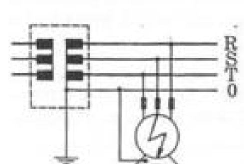
U niskonaponskim postrojenjima (do 1 kV) primjenjujemo sljedeće zaštitne mjere:

1. *Zaštitno izoliranje.* Da bi se u slučaju kvara na električnim postrojenjima izbjegla opasnost od dodira onih kovinskih dijelova koji bi tom prilikom mogli doći pod napon (kućišta sklopki, ručice polužnih prekidača itd.), prevlačimo ih izolacijskim tvarima ili polažemo po tlu gumene ili plastične prostirače. Treba onemogućiti istodobni dodir možebitne bliske vodovodne instalacije.

2. *Primjena malog napona.* U vlažnim prostorijama, kotlovnicama, spremištima i sl., a osobito za prenosiva trošila (ručne svjetiljke, male motore i dr.) rabimo napon najviše do 42 V tj. »mali napon«. Obično ga dobivamo transformatorom (s odijeljenim namotima!), pri istosmjernoj struji akumulatora. Važno je da mreža malog napona bude galvanski potpuno odvojena od primarne mreže i da ne bude uzemljena.



3. *Uzemljenje.* Uzemljenje *a* ima zadatak pri kvaru trošila, kad vanjski dijelovi dođu pod napon, strujni krug zatvoriti kroz zemlju i tom strujom, izbacivanjem osigurača *b*, prekinuti napajanje defektnog trošila. Zbog toga otpori uzemljenja moraju biti dovoljno maleni. Zato se uzemljenje većih trošila iz ekonomskih razloga izbjegava.



4. *Nulovanje.* Nulovanje je spajanje dijelova postrojenja, koje želimo zaštititi, na uzemljeni neutralni vodič. Tako svaki spoj sa zaštićenim dijelom ostane kratki spoj i svaka struja kratkog spoja izazove iskapčanje defektnog trošila. Valja vodove dimenzionirati tako da pri kratkom spoju između faznog vodiča i nul-voda uistinu teče struja koja će sigurno iskopčati.

5. *Primjena sustava zaštitnih vodova.* U prostorno ograničenim mrežama (tvornice, rudnici) s vlastitim generatorima ili transformatorima (s odijeljenim namotima), gdje je važno održavati pogon i u slučaju dozemnog spoja jedne faze, vežu se trošila na »sustav zaštitnih vodova« koji je uzemljen (kovinske konstrukcije zgrada, vodovod, tračnice i sl.).

6. *Zaštitne sklopke.* Kod strujne zaštitne sklopke, pri kojoj je trošilo uzemljeno, struja defekta kroz uzemljivač prouzrokuje aktiviranje sklopke. Kod naponske sklopke, pri kojoj je trošilo uzemljeno kroz samu sklopku, dolazi do isklopa kad se na kućištu trošila zbog defekta pojavi određeni napon.

ELEKTRIČNA OPREMA MOTORNIH VOZILA

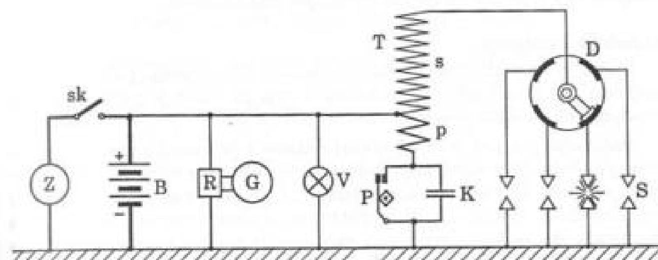
Motorna vozila pokreću gotovo isključivo motori s unutarnjim izgaranjem sustava Otto ili Diesel (str. 272). Za njihovo djelovanje i dodatne zahtjeve vozilu je potrebna sljedeća električna oprema:

- akumulatorska baterija (B)
- pokretač (Z)
- generator (G) s regulatorom (R)
- trošila u vozilu (V),

a sa motorima sustava Otto još i:

- uređaj za paljenje: indukcijski svitak (T), prekidač (P) s kondenzatorom (K), razvodnik (D) i svjećice (S).

Nazivni napon instalacije je 6, 12 ili 24 V.



Pokretač

Motori s unutarnjim izgaranjem ne mogu krenuti sami od sebe. Valja ih pokrenuti posebnim pokretačem tj. elektromotorom ili pomoću komprimiranog zraka i sl.

Na motornim vozilima pokretač je uglavnom istosmjerni serijski elektromotor kojeg napaja akumulatorska baterija. Uklapanje pokretačke sklopke (sk) (»brave«) redovito je elektromagnetno.

Potrebna pokretna struja je vrlo velika (nekoliko stotina A, iznimno i 1000 A). Posebno je zimi opterećenje najveće za akumulatorsku bateriju (u kojoj niske temperature smanjuju brzinu reakcije elektrokemijskog procesa) a i za motor (u kojem niske temperature povećavaju trenje u ležajima zbog povećane viskoznosti maziva i tako ometaju rasplinjavanje i paljenje goriva). Zbog velike pokretne struje pokretač smije biti u pogonu samo kratko vrijeme.

Pokretač je spojen s motorom vozila samo za vrijeme pokretanja. Kad se motor samostalno pokrene, pokretač se odvoji pomoću posebnog rasklopnog uređaja.

Generator i regulator

Generator motornog vozila puni akumulatorsku bateriju u kojoj se skuplja potrebna električna energija za pokretanje, a njom se napajaju i ostala trošila u vozilu (signalne svjetiljke, truba, prednje svjetiljke itd.). Motorima sa unutarnjim izgaranjem sustava Otto generator dobavlja i struju uređaju za paljenje.

Generator je vezan neposredno s motorom vozila. Stoga je njegova brzina vrtnje isto tako promjenljiva kao i brzina vrtnje motora tj. generator proizvodi vrlo promjenljivi napon. Da bi se dobio potreban jednoličan napon, generatoru je priključen *generatorski regulator* koji upravlja njegovim pravilnim radom.

Generator može biti istosmjerni (dinamo) ili izmjenični (alternator). Izmjenični generator mora biti opremljen ispravljačem.

Uređaj za paljenje

Motori s unutarnjim izgaranjem sustava Otto trebaju još i uređaj za paljenje koji stvara iskre na svjećicama motora. Za to je potrebna struja visokog napona koju proizvodi indukcijski svitak.

Indukcijski svitak je zaista transformator s primarnim (p) i sekundarnim (s) namotajem. Kroz primarni namotaj teče istosmjerna struja nazivnog napona instalacije koja sama ne može inducirati napon u sekundarnom krugu. Za to je potreban *prekidač* struje tako vezan s motorom, da prekine primarnu struju u trenutku potrebne iskre na svjećici. Trenutak nastanka iskre (predpaljenje!) podesi se relativnim pomakom prekidnog batića s obzirom na njegov pogon s osovine. Za vrijeme pogona motora nastajanje iskre prilagođava se brzini vrtnje motora centrifugalnom regulacijom, a u ovisnosti od podtlaka u usisnoj cijevi motora. Preveliko iskrenje na kontaktima prekidača (na »platinama«, koje su od volframa ili slične kovinske slitine) smanjuje *kondenzator* koji uz to povećava inducirani napon.

Prekidom primarne struje u svitku za paljenje smanjuje se magnetno polje, izazivajući tako u sekundarnom krugu inducirani napon koji je - zbog velikog broja sekundarnih zavoja - vrlo visok (do 30 kV). Struja visokog napona potom se vodi u razvodnik koji je prenosi u svjećice. Elektrode na svjećicama razmaknute su 0,5 ... 0,7 mm, prema mogućnosti preskoka jake iskre. Razvodnik je vezan s motorom tako da iskrenje na svjećicama odgovara potrebnom rasporedu djelovanja pojedinih cilindara motora.

*

Suvremenijim motorima s unutarnjim izgaranjem urađen je elektronski uređaj za paljenje.

Akumulataori

Električni akumulatori su zbirnici električne energije u kemijskom obliku. Osim posebnih izradbi akumulatora (npr. alkalnih sa čeličnom odnosno kadmijevom i nikalnom elektrodom i dr.) najrašireniji je olovni akumulator.

Olovni akumulator ima - u svakoj akumulatorskoj ćeliji - po dvije olovne elektrode u razrijeđenoj sumpornoj kiselini (elektrolitu). Obje se elektrode u elektrolitu oblože olovnim sulfatom ($PbSO_4$).

Pri punjenju akumulatora (dovođenjem istosmjerne struje) nastaju na pozitivnoj elektrodi (anodi) olovni dioksid (PbO_2) (smeđi), na negativnoj elektrodi (katodi) čisto olovo (Pb) (sivo), u elektrolitu se povećava koncentracija sumporne kiseline (H_2SO_4). Pri pražnjenju (kad pozitivna elektroda djeluje kao katoda, a negativna elektroda kao anoda) proces je obratan.

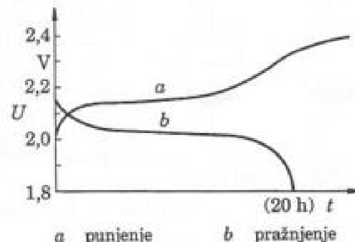


$$2\,PbSO_4 + 2\,H_2O \underset{\text{pražnjenje}}{\overset{\text{punjenje}}{\rightleftarrows}} PbO_2 + Pb + 2\,H_2SO_4$$

Za vrijeme punjenja i pražnjenja mijenja se gustoća ϱ u elektrolitu:

Stanje akumulatora		prazan	normalan	pun
gustoća ϱ	kg/dm³	1,12 ... 1,14	1,20 ... 1,24	1,26 ... 1,285
	°Bé	15,5 ... 17,7	24,1 ... 27,9	29,8 ... 32,0

Priključni napon akumulatorske ćelije je ≈ 2 V. Pri kraju punjenja diže se napon do 2,4 V, dok pri početku pražnjenja padne odmah na ≈ 2,15 V, da bi se potom ustalio za duljega pražnjenja na ≈ 2 V. Kad napon padne do 1,8 V valja prekinuti pražnjenje.



a punjenje *b* pražnjenje

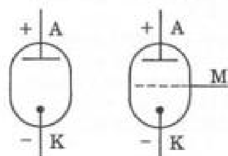
Snaga ak umulatora određena je količinom električne struje (A h) koju akumulator može dati pri pražnjenju. Ovisna je o veličini i kakvoći aktivnih površina olovnih ploča i njihovom broju u svakoj akumulatorskoj ćeliji.

Snaga akumulatora se smanjuje s porastom struje tijekom pražnjenja. Nazivna je snaga određena strujom pri kojoj se napunjeni akumulator prazni 20 sati.

Nikal-kadmijski akumulator djeluje elektrokemijskim sustavom Ni-hidroksid-Cd te može biti hermetično zatvoren. Nazivni je napon 1,2 V, a pražnjenje valja prekinuti pri naponu 1 V. Kao elektrolit služi kalijev hidroksid (KOH).

Električni ventili

Električni ventili imaju svojstvo provođenja struje u jednom smjeru (pri malom otporu), dok je u suprotnom smjeru sprječavaju (pri velikom otporu). Prema izradbi možemo ih podijeliti na glavne skupine: elektronke, živine ventile i poluvodičke ventile.



Elektronke su zrakoprazne (vakuumske) cijevi u kojima su ugrađene anoda (A) i katoda (K), a pri upravljanim elektronkama još i upravljačka mrežica (M).

Iz užarene katode gibIju se u praznom prostoru elektroni prema anodi, tj. elektronka provodi struju od anode (+) prema katodi (–), dok je u suprotnom smjeru ne propušta.

Napon na upravljačkoj mrežici za upravljanje vrlo jako utječe na veličinu toka elektrona. Već i mala promjena napona U_M izaziva veliku promjenu struje I kroz elektronku.

Obzirom na razne izvedbe elektronki može teći među anodom i katodom struja $I = 10^{-2} \dots 10^{2}$ A pri znatnom naponu $U = 10 \dots 0{,}5 \cdot 10^{6}$ V.

Živini ventili su cijevi u kojima je katoda živa, dok su u cijevi ioni živinih para. »Paljenje« (električni spoj među katodom i anodom) izvodi se posebnom napravom.

I u živinim ventilima teče struja od anode prema katodi.

Struja u živinim ventilima znatno je veća nego u elektronkama: $I = 10 \dots 10^{5}$ A, i to pri naponu U do 10^{6} V.

Poluvodički ventili

Poluvodiči su tvari koje su po vodljivosti između vodiča (kovina) i izolatora.

Primjeri električne otpornosti ϱ u $\mu\Omega$ m [1]:

Vodiči	srebro (Ag) ≈ 10^{-2}, željezo (Fe) ≈ 10^{-1}
Izolatori	porculan ≈ 10^{18}, tinjac ≈ 10^{20}
Poluvodiči	silicij (Si) $10^{2} \dots 10^{10}$, germanij (Ge) $10^{2} \dots 10^{6}$

Pod različitim utjecajima imaju poluvodiči svojstva vodiča ili su bliže izolatorima.

Poluvodički ventili (diode, tranzistori, tiristori i trijaci) su zbog svojih dobrih fizikalnih svojstava i razmjerno niske cijene nadomjestili druge vrste ventila na praktično svim područjima.

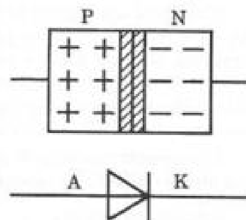
[1] $\mu\Omega$ m = Ω mm²/m.

Diode

Diode su neupravljani ventili, sastavljeni od dva sloja poluvodiča – područja P i područja N:

– područje P nastaje, ako je u monokristalu 4-valentnoga poluvodiča (npr. Ge) prisutan 3-valentni element (npr. In). Tako nastaju u kristalnoj rešetki elektronske praznine, koje kristalu daju pozitivan naboj;

– područje N nastaje, ako je u monokristalu 4-valentnoga poluvodiča prisutan 5-valentni element (npr. Sb). Tada slobodni elektroni u kristalnoj rešetki uzrokuju negativan naboj.



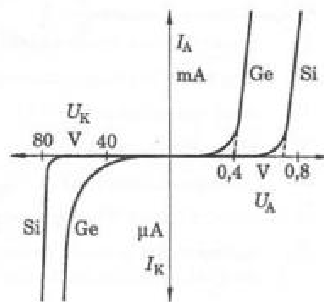
Pri izravnom dodiru područja P i N u jednostrukom kristalu nastaje na granici dvaju područja »zaporni sloj«.

Na strani područja P ima dioda anodu (A), a na strani područja N katodu (K).

Provodni smjer

Priključi li se na anodu prema katodi pozitivni napon U_A, smanjit će se zaporni sloj.

Pri difuzijskom naponu (pri Ge diodi: 0,2 ... 0,4 V, pri Si diodi: 0,6 ... 0,8 V) pojavit će se struja I_A, koja s daljnjim povišenjem napona U_A raste vrlo brzo. (Plosnata izvedba dioda omogućuje struju: pri Ge diodi do 100 A, pri Si diodi do 500 A i više.)



Zaporni smjer

Priključi li se na anodu prema katodi negativni napon U_K, zaporni sloj će se raširiti i propustiti samo malenu struju (pri Ge u µA, pri Si u nA). Pri visokom (»probojnom«) naponu poraste struja I_K skokomice (te može uništiti diodu).

Porast temperature zapornog sloja smanjuje napon U_A i povećava struju I_K.

Diode se, zbog izrazitog karakterističnog svojstva provođenja struje samo u jednom smjeru, rabe poglavito kao ispravljači struje.

Ispravljači

Izmjenična se struja ispravlja u istosmjernu motor-generatorima, kontaktnim ili elektroničkim ispravljačima.

Kontaktni ispravljači su elektroničke sklopke, koje su sklopljene samo za vrijeme jedne polovine perioda izmjenične struje. Sklopkama upravlja bregasta osovina koja se vrti sinkrono s frekvencijom ulaznog napona. Brzo trošenje dijelova smanjuje ekonomičnost tih ispravljača ograničujući tako njihovu uporabu jedino na područje jačih struja ($I = 10^3 \dots 10^5$ A pri naponu od $U = 50 \dots 10^3$ V).

Elektronski ispravljači pretežno su poluvodički ventili, osobito diode (za struje do 2000 A pri naponu do 4000 V).

Spojevi ispravljača

Ispred ispravljača skoro uvijek je najprije transformator, koji transformira struju i napon prikladno ispravljaču, a ujedno izolira izlaz ispravljača od naponske mreže.

Nepoželjne vremenske oscilacije ispravljene struje smanjuju se ispravljačkim filtrima koji se sastoje iz otpora, kondenzatora i prigušnice (induktiviteta). Veća se stabilnost struje postiže dodatnim elektroničkim stabilizatorima napona ili struje.

U sljedećim su shemama:

U_t izlazni napon transformatora (V)

I_t izlazna struja transformatora (A)

P_t snagu transformatora (VA)

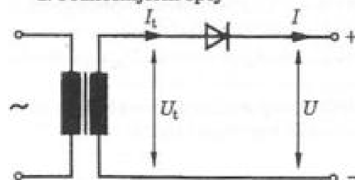
U istosmjerni napon (V)

I istosmjerna struju (A)

R,L otporno i induktivno opterećenje

U_c opterećenje suprotnim naponom (kondenzatorima, akumulatorima i istosmjernim motorima).

1. Jednosmjerni spoj



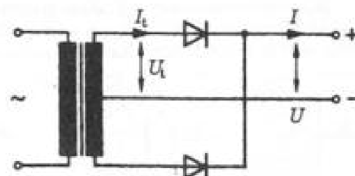
R, L	U_c
$U_t = 2{,}22\ U$	$0{,}85\ U$
$I_t = 1{,}57\ I$	$2{,}1\ I$
$P_t > 3{,}1\ U I$	$1{,}73\ U I$

(Poluvalno ispravljanje)

2. Središnji spoj

R, L	U_c
$U_t = 1{,}11\ U$	$0{,}8\ U$
$I_t = 0{,}78\ I$	$1{,}11\ I$
$P_t > 1{,}48\ U I$	$1{,}48\ U I$

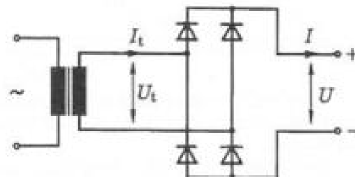
(Punovalno ispravljanje)



3. Mosni spoj

R, L	U_c
$U_t = 1{,}11\ U$	$0{,}8\ U$
$I_t = 1{,}11\ I$	$1{,}57\ I$
$P_t > 1{,}24\ U I$	$1{,}24\ U I$

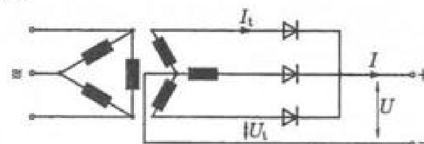
(Punovalno ispravljanje)



4. Središnji zvjezdasti spoj

R, L	U_c
$U_t = 0{,}86\ U$	$0{,}77\ U$
$I_t = 0{,}58\ I$	$1{,}75\ I$
$P_t > 1{,}35\ U I$	$1{,}57\ U I$

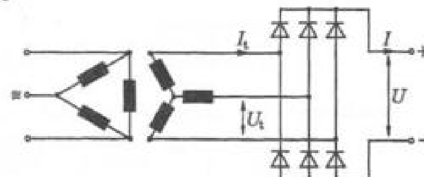
(Trofazno poluvalno ispravljanje)



5. Mosni zvjezdasti spoj

R, L	U_c
$U_t = 0{,}74\ U$	$0{,}74\ U$
$I_t = 0{,}82\ I$	$1{,}82\ I$
$P_t > 1{,}05\ U I$	$1{,}05\ U I$

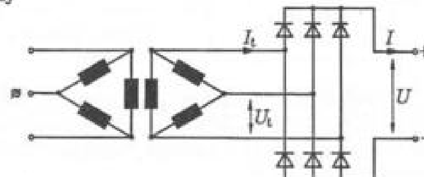
(Trofazno punovalno ispravljanje)



6. Mosni trokutasti spoj

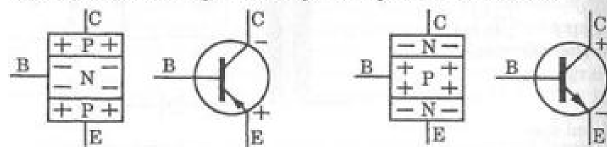
R, L	U_c
$U_t = 0{,}74\ U$	$0{,}74\ U$
$I_t = 0{,}82\ I$	$1{,}82\ I$
$P_t > 1{,}05\ U I$	$1{,}05\ U I$

(Trofazno punovalno ispravljanje)



Tranzistori

Bipolarni tranzistor (ukratko: tranzistor) je monokristalni germanijev ili sicilijev poluvodni element s tri područja, raznolike vrste vodljivosti, koje slijede jedna drugu. Razlikujemo dvije vrste tranzistora:



Vrsta PNP   Vrsta NPN

Poluprovodne elektrode: – središnje područje: baza (B)
– vanjsko područje: emiter (E) i kolektor (C).

Baza je elektroda koja služi za upravljanje. Njenom strujom I_B upravlja kolektorska struja I_C. (Pri tom može struja I_B biti 100 ili više puta manja od struje I_C.)

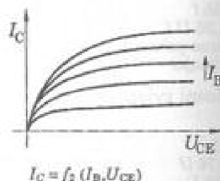
Emiterska je struja I_E zbroj bazne i kolektorske struje

$$I_E = I_B + I_C .$$

Bazna struja I_B ovisna je o naponu među bazom i emiterom U_{BE}, kolektorska struja I_C je ovisna od baznoj struji I_B i naponu među kolektorom i emiterom U_{CE}:

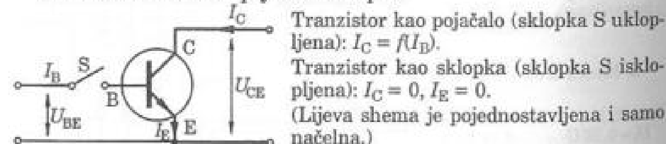


$I_B = f_1\,(U_{BE})$



$I_C = f_2\,(I_B, U_{CE})$

Tranzistori se rabe za pojačala i sklopke.



Tranzistor kao pojačalo (sklopka S uklopljena): $I_C = f(I_B)$.

Tranzistor kao sklopka (sklopka S isklopljena): $I_C = 0$, $I_E = 0$.

(Lijeva shema je pojednostavljena i samo načelna.)

Niskofrekventni tranzistori pojačavaju niskofrekventne (kao i istosmjerne) struje ($U < 100$ V, $I < 500$ mA) uz faktore pojačanja β ($= \Delta I_C/\Delta I_B$) = 30 ... 300.

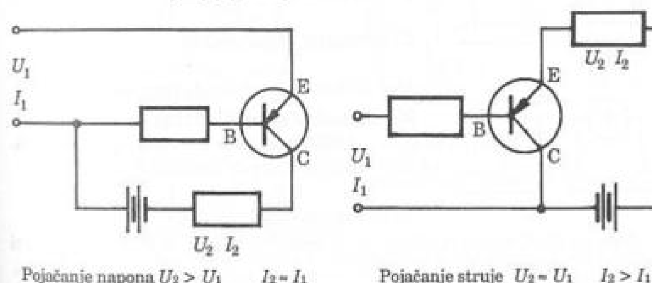
Tranzistori snage pojačavaju (ili preklapaju) struje do 100 A pri naponu od više stotina V.

Osnovni tranzistorski spojevi

U_1 ulazni izmjenični signal R_E otpor emitera
U_2 izlazni izmjenični signal R_C otpor kolektora
U_B istosmjerni napojni napon

	Emiterski spoj	Kolektorski spoj	Bazni spoj
	R_C, U_1, E, U_2, + , −	C, U_1, R_E, U_2, +, −	R_C, U_1, B, U_2, +, −
Pojačanje			
– napona	100 ... 10 000	< 1	100 ... 10 000
– struje	10 ... 500	10 ... 500	< 1
– snage	1000 ... 100 000	10 ... 500	100 ... 10 000
Otpor			
– ulazni	10 Ω ... 5 kΩ	500 Ω ... 5 kΩ	< 1 Ω ... 1 MΩ
– izlazni	10 Ω ... 50 kΩ	10 Ω ... 1 MΩ	100 kΩ ... 10 kΩ
Fazni pomak	180°	0°	0°

Jednostavni stupanj pojačanja



Pojačanje napona $U_2 > U_1$ $I_2 \approx I_1$

Pojačanje struje $U_2 \approx U_1$ $I_2 > I_1$

Tiristori

Tiristori (upravljane diode) su četveroslojni poluprovodni elementi, opremljeni elektrodom za upravljanje, a djelovanjem slični sklopkama (»isključeno« i »uključeno«). Rabe se za regulaciju pri upravljanim ispravljačima i za isklapanje velikih snaga (svaka jedinica po više desetaka kW).

MJERENJE ELEKTRIČNIH VELIČINA

S obzirom na vremenski promjenljive pojave pri mjerenju električnih veličina valja razlikovati pojmove:

Trenutna vrijednost u_t je vrijednost izmjenične veličine u bilo kojem trenutku.

Srednja vrijednost u_{med} je aritmetička srednja vrijednost apsolutnih iznosa trenutnih vrijednosti.

Efektivna vrijednost u je kvadratni korijen zbroja kvadrata trenutnih vrijednosti

$$u_t = f(t) \qquad u_{med} = \frac{1}{T}\int_0^T |f(t)|\,dt \qquad u = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T f^2(t)\,dt}.$$

Električna mjerila

1. *Mjerilo s okretnim svitkom* mjeri linearnu srednju vrijednost istosmjerne struje. Pri njemu je otklon kazaljke α upravno razmjeran istosmjernoj struji I kroz mjerilo: $\alpha = c\,I$ (c = const). Rabi se kao mjerilo napona i struje.

Mjerilo istosmjernog napona (voltmetar)

Mjerno područje mjerila napona (45 mV ... 1500 V) može se povećati n-puta dodavanjem predotpora R

$$R = R_0\,(n-1)$$

R_0 unutarnji otpor mjerila.

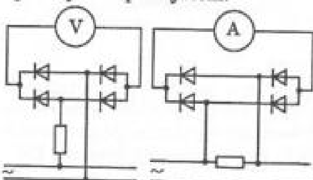
Mjerilo istosmjerne struje (ampermetar)

Mjerno područje mjerila struje (1 mA ... 1000 A) može se povećati n-puta uključivanjem paralelnog otpora (shunt) R

$$R = R_0/(n-1)$$

R_0 unutarnji otpor mjerila.

Mjerilo s okretnim svitkom za izmjenični napon ili struju mora biti opremljeno ispravljačem.



Mjerilo pokazuje srednju vrijednost koja je jednaka efektivnoj samo u slučaju čistih sinusnih veličina.

Pri mjerenju izmjenične struje rabe se, pri velikim strujama ili visokim naponima, strujni odn. naponski reduktori (transformatori).

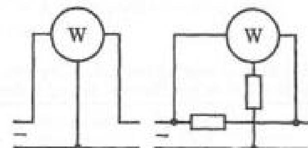
Točnost mjerila

Mjerna pogrješka %	±0,1	±0,2	±0,5	±1,0	±1,5	±2,5	5,0
Razred točnosti	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5	5,0

2. *Mjerilo s okretnim željezom* mjeri kvadratnu srednju vrijednost odnosno efektivnu vrijednost mjerene veličine. Otklon kazaljke α upravno je razmjeran s kvadratom struje I kroz mjerilo: $\alpha = c\,I^2$ (c = const). Ljestvica za efektivnu vrijednost je kvadratna.

Mjerilo s okretnim željezom rabi se za istosmjernu i izmjeničnu struju. Pri mjerenju napona (voltmetar) može se mjerno područje povećati serijskim predotporima, dok se pri mjerenju struje (ampermetar) ne rabe paralelni otpori (shunt) već se umjesto toga podijeli magnetni namotaj na više dijelova za više mjernih područja.

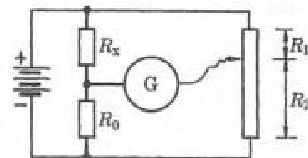
3. *Elektrodinamična mjerila*



a) Elektrodinamično mjerilo mjeri umnožak dviju veličina. Otklon kazaljke $\alpha = c\,I_1 I_2$ (c = const). Rabi se za mjerenje snage (vatmetar).

b) Ferrarisovo mjerilo koristi se vrtložnim strujama za mjerenje energije izmjenične struje (električna brojila).

4. *Mjerenje električnog otpora*



Električni otpor R određuje se mjerenjem struje I i pada napona ΔU kroz otpor: $R = \Delta U/I$.

Električni otpor R može se mjeriti pomoću Wheatstoneovog mosta

$$R_x = R_0\,\frac{R_1}{R_2}$$

R_0 poznati otpor, R_1/R_2 se izmjeri

G galvanometar (mora pokazivati 0).

5. *Elektronska mjerila*

Najpoznatija elektronska mjerila:

a) Oscilograf je brzo pisalo linija za registriranje trenutnih vrijednosti veličina pri frekvencijama do nekoliko kHz.

b) Osciloskop (katodni osciloskop) je katodna cijev u kojoj se otklanjanjem elektronske zrake dobiva na zaslonu s fluorescentnim slojem dvodimenzionalni prikaz trenutnih vrijednosti mjerenih veličina. Kod prikazivanja periodnih pojava uz vremenski pomak, usklađen s frekvencijom pojave, dobiva se njegova mirujuća slika.

c) Brojila impulsa su uređaji kojima se može prebrojiti broj periodičkih pojava (ako ih je moguće prikazati električnim impulsima). Poglavito se rabe za mjerenje frekvencije. Točnost je brojenja 10^{-7} ... 10^{-8}.

OPTIKA I AKUSTIKA

Svjetlost

Vidljiva svjetlost je dio elektromagnetnih valova koji se – prema valnim duljinama λ – dijeli na:

kozmičke zrake	$\lambda =$ 0,1	... 10 fm
gama zrake	$\lambda =$ 10	... 1 000 fm
rendgenske zrake	$\lambda =$ 1	... 1 000 pm
ultraljubičasto zračenje	$\lambda =$ 1	... 390 nm
vidna svijetlost	$\lambda =$ 390	... 770 nm
infracrveno zračenje	$\lambda =$ 0,77	... 1 000 µm
mikrovalove (televizija)	$\lambda =$ 1	... 1 000 mm
radiovalove	$\lambda =$ 1	... 10 000 m.

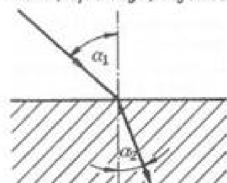
Svjetlosna osjetljivost oka (najveća = 1 pri λ = 555 nm) i raspoznavanje boja (koje se prelijevaju jedna u drugu):

$\frac{\lambda}{nm}$	Boja	Relativna osjetljivost na svjetlost	$\frac{\lambda}{nm}$	Boja	Relativna osjetljivost na svjetlost
400	ljubičasta	0,000 4	560	žuta	0,995
450	modra	0,035	580	narančasta	0,870
480		0,139	600		0,631
500	modrozelena	0,323	620	narančastocrvena	0,381
520	zelena	0,710	640	crvena	0,175
540		0,954	660		0,061
550	zelenožuta	0,995	700	tamnocrvena	0,004 1
555		1,000	750		0,000 12

Brzina širenja svjetlosti u:

vakuumu	c_0 = 299 792 458 m/s (točno)
vodi	$c = 224 \cdot 10^6$ m/s
staklu	$c \approx (176 \ldots 195) \cdot 10^6$ m/s
dijamantu	$c = 122 \cdot 10^6$ m/s.

Lom (refrakcija) svjetlosti



Indeks loma n je omjer sinusa upadnog kuta α_1 i kuta loma α_2 te je jednak omjeru brzina svjetlosti

$$n = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}.$$

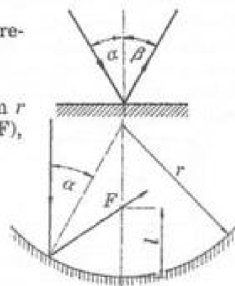
S obzirom na zrak indeks loma je za:

vodu	$n = 1{,}333$
staklo	$n \approx 1{,}520 \ldots 1{,}740$
dijamant	$n = 2{,}417$.

Brzina širenja vala c je umnožak frekvencije f i duljine vala λ

$$c = f\lambda.$$

Odbijanje (refleksija)



Pri odbijanju valova od ravne površine kut refleksije β jednak je upadnom kutu α

$$\beta = \alpha.$$

Na konkavnoj površini kugle s polumjerom r upadni se valovi odbijaju kroz žarište (fokus F), koje je udaljeno od vrha površine za razmak l

$$l = \frac{r}{2}\left(2 - \frac{1}{\cos \alpha}\right).$$

Pri malim upadnim kutovima α je

$$\cos \alpha \approx 1 \qquad l \approx r/2.$$

Zvuk, buka

Zvuk je pojava koja nastaje titranjem čestica u tvarnim sredinama, tj onima koja imaju masu i elastičnost (npr. u zraku, vodi ali i u krutim tijelima).

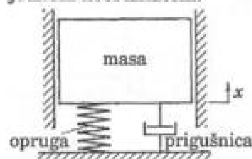
To titranje je titranje tlaka oko ravnotežnog položaja. Ravnotežni položaj zvuka u zraku je atmosferski tlak veličine 10^5 Pa. Titraj tlaka širi se od izvora brzinom zvuka.

Brzina širenja zvuka c u:

plinovima iznosi $c = \sqrt{\varkappa R T}$ (v. str. 236),
zraku iznosi 332 m/s pri 0 °C; 343 m/s pri 20 °C,
tekućinama i krutim tvarima (pri 20 °C).

Tvar	$\frac{c}{m/s}$	Tvar (kovina)	$\frac{c}{m/s}$
voda	1 485	Al	5 100
led (–4 °C)	3 200	Cu	3 800
drvo – mekano	4 500	Fe	5 200
– tvrdo	3 400	Hg	1 430
pluto	500	Ni	4 900
guma	50	Pb	1 300
opeka	3 600	Sn	2 600
staklo	5 000	Zn	3 700

Titranje u krutim tijelima nazivamo vibracije. One su jedan od glavnih uzroka nastanka zvučnih titranja. Djelovanje vibracija je najveće u infrapodručju zvučnog spektra i u daljnjem području čujnog spektra, do 1 kHz. Mehaničke vibracije su slobodne i prisilne radi djelovanja vanjske sile. Kod slobodnih vibracija nema vanjske sile, već je titranje posljedica početnog pomaka ili brzine kao posljedica nekog udarca. Prisilne vibracije mogu biti periodične (one koje se s vremenom ponavljaju) i neperiodične (one koje se s vremenom ne ponavljaju). Vibracije se isto tako mogu klasificirati prema stupnju slobode gibanja, koji određuje broj koordinata kojima možemo pojavu podrobno razmotriti. Vibracijski sustav koji se sastoji od mase, krutosti i otpora viskoznog trenja nazivamo sustav s jednim stupnjem slobode, gdje se položaj mase može definirati samo s jednom koordinatom.



Svaki mehanički sustav ima osnovnu frekvenciju titranja sustava ako ga se pobudi i pusti slobodno titrati. Osnovna frekvencija s jednim stupnjem slobode sustava prema slici određena je jednadžbom:

$$f_n = 1/2\pi \cdot \sqrt{k/m} \text{ Hz},$$

gdje je k krutost u N/m, a m masa titrajnog tijela u kg.

Osnovna je frekvencija f titranja žice, koja ima gustoću ϱ, presjek A i duljinu l, a napeta je sa silom F

$$f = 1/2l \cdot \sqrt{F/A\varrho}.$$

Svako zvučno titranje sadrži određenu obavijest. Ako je ona korisna ili ugodna, govorimo o signalu ili melodiji, a ako je nekorisna ili ometajuća, govorimo o buci, šumu ili smetnjama. Buka je, znači, neželjeni oblik zvuka.

Buka neznatno utječe na ljudsko zdravlje, ali se mogu pojaviti psihofizičke smetnje, smetnje u krvotoku, u radnoj sposobnosti itd. Dulja izloženost buci iznad 80 ... 90 dB obično uzrokuje gubitak sluha. Zato treba težiti smanjenju buke i zaštiti čovjeka od nje.

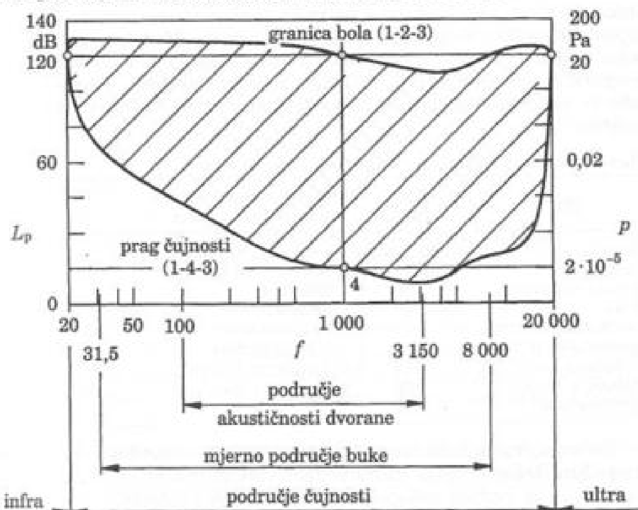
Zvučni valovi dijele se prema frekvenciji f na:

infrazvuk	$f < 20$ Hz
čujni zvuk	$f = 20$ Hz ... 20 kHz
ultrazvuk	$f > 20$ kHz.

Zvučni tlak, jakost zvuka i zvučna snaga

Ljudsko uho prima promjene zvučnog tlaka u širokim granicama, pri frekvenciji 1 kHz do $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (prag čujnosti) do 20 Pa (granica bola).

Prag čujnosti i granica osjetljivosti uha nisu jednake u cijelom frekvencijskom području. Najveća je osjetljivost približno 1 000 Hz.



Čujno područje: 1-2-3-4

Efektivna vrijednost zvučnog tlaka (pri $f = 1$ kHz):

na pragu čujnosti	$p_0 =$ 0,000 02	Pa			
šapat	0,000 2	Pa	glasovir	0,2	Pa
razgovor	0,002	Pa	orgulje	2	Pa
glasan razgovor	0,02	Pa	sirena	> 20	Pa.

Pri ocjenjivanju razine buke rabimo jedinicu decibel (dB). To je desetina vrijednosti logaritma odnosa promatrane veličine (tlaka, intenziteta ili snage) prema njenoj referentnoj vrijednosti:

zvučni tlak	$L_p = 10 \log_{10} (p/p_0)^2 = 20 \log_{10} (p/p_0)$
zvučni intenzitet	$L_I = 10 \log_{10} (I/I_0)$
zvučna snaga	$L_W = 10 \log_{10} (W/W_0)$.

Pri tome su referentne vrijednosti: $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, $I_0 = 10^{-12}$ W/m² i $W_0 = 10^{-12}$ W.

Pri tlaku okolice 1 bar i temperaturi 20 °C razina zvučnog tlaka jednaka je razini jakosti (intenzitetu) zvuka $L_p = L_I$. Ako mjerimo zvučni

intenzitet površine 1 m² od zvučnog izvora razina je zvučne snage jednaka razini zvučnog intenziteta i tlaka ($L_p = L_I = L_W$). Nikada razinu zvučnog tlaka ne treba zamijenjivati s razinom zvučne snage; zvučna snaga je mjerilo akustičke snage koju izvor zrači (isijava). Međutim, zvučni tlak ovisi ne samo o snazi izvora već i o udaljenosti izvora i o akustičkim svojstvima prostora oko izvora. Razina zvučnog tlaka smanjuje se za 6 dB ako se udaljenost od izvora udvostruči, međutim zvučna snaga se ne mijenja.

Razina zvučnog tlaka L_p u različitim okolnostima:

Signal	L_p dB (A)	Dopuštena granica buke u prostorijama [1]	L_p dB (A)
šapat	10 ... 30	koncertna dvorana	30
razgovor	40 ... 50	bolesnička soba	30 ... 35
glasan razgovor	70	čitaonica	35
vika	80	učionica	40
automobilska truba	90	studijska soba	20 ... 40
pneumatski bat	100	soba za sjednice	50
zakivanje kotlova	110	kongresna dvorana	55
mlazni zrakoplov	120	ured (sa strojevima)	70 ... 75
granica bola	130		

Pri ocjenjivanju buke stroja ili uređaja važna je također frekvencijska raspodjela buke. Većina instrumenata opremljena je za frekvencijsku analizu buke vrstom uskopojasnih filtara, koji omogućuju određivanje razine zvučnog tlaka u pojedinim frekvencijskim pojasevima. Čujno frekvencijsko područje jednoliko je razdijeljeno u 10 oktava ili 31 tercu. Oktava i terca se označuje njihovim središnjim frekvencijama.

Oktave:

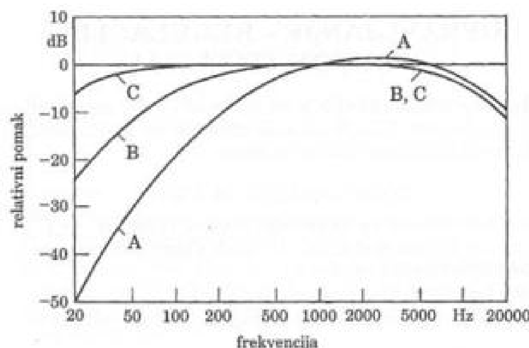
31,5	63	125	250	500
1 000	2 000	4 000	8 000	16 000 Hz

Terce:

20	25	**31,5**	40	50	**63**	80	100
125	160	**250**	315	400	**500**	630	800
1 000	1 250	1 600	**2 000**	2 500	3 150	**4 000**	5 000
6 300	**8 000**	10 000	12 500	**16 000**	20 000 Hz		

Mikrofon za mjerenje zvuka ima ravnu frekvencijsku karakteristiku neovisnu o frekvenciji. Ljudsko uho ne čuje jednako pri svim frekvencijama (v. sliku str. 323). Zbog toga instrumenti imaju ugrađene korektivne

[1] Dozvoljene razine buke u prostorijama su normirane.



filtre, kojima korigiramo odziv instrumenta na približnu razinu uha. Prema IEC/179 (1973.) normirane su tri korekcijske krivulje: A za niske, B za srednje i C za visoke razine buke, koje simboliziraju različite osjetljivosti za pojedine frekvencije. Za impulsnu buku i buku zrakoplova uvedene su krivulje D i E.

Za određivanje vrijednosti buke strojeva pretežno rabimo korekcijsku krivulju *a*, koja se većinom razlikuje od izmjerene razine buke ovisno o oktavnom području za vrijednosti L_A:

oktave/Hz	31,5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	16 000
L_A/dB:	−39	−26	−16	−9	−3	0	+1	+1	−1	−7

Zbog toga mora se uz dB obvezno navesti uporabljenu korekcijsku krivulju, npr. dB(A), dB(B) ili dB(C).

Tonska ljestvica

Oktava je područje tonova od početne frekvencije *f* do konačne frekvencije 2*f*. Stupnjevanje frekvencije tonova u oktavi je po 12-stupanjskoj ljestvici (stupnjem $2^{1/12} = 1{,}059\,463$):

Ton	c	cis des	d	dis es	e	f	fis ges	g	gis as	a	ais b	h	c
Stupanj	1,00	1,06	1,12	1,19	1,26	1,33	1,41	1,50	1,59	1,68	1,78	1,89	2,00

Ishodište tonske ljestvice je oktava na granici čujnog zvuka frekvencije tona c: $f_c = 16{,}35$ Hz. Frekvencije f_a tonova a u n-toj oktavi su $2^n f$:

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8
f_a/Hz	27,5	55	110	220	440	880	1760	3520	7040

UPRAVLJANJE - REGULACIJA - - AUTOMATIZACIJA

Regulacijska tehnika obrađuje odnose među uzrokom i posljedicom u tehničkim sustavima. Njen je zadatak utjecanje na ulazne veličine na taj način, da se dobiju željene izlazne veličine.

REGULACIJSKI ČLANOVI

Regulacijski članovi su dinamički članovi regulacijskog sustava u kojima se dobivaju iz danih ulaznih veličina x_u određene izlazne veličine x_i.



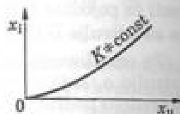
Statička karakteristika regulacijskog člana

U svakom su regulacijskom članu ulazna i izlazna veličina međusobno ovisne:

$$x_i = f(x_u) \qquad x_i = K\,x_u$$

Koeficijent (statičkog) pojačanja $K = x_i/x_u$ je odnos izlazne i ulazne veličine u stacionarnom stanju, a može biti linearan (K = const) ili nelinearan ($K \neq$ const):

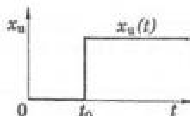


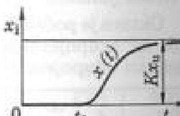


U regulacijskoj tehnici obrađuju se linearni odnosi. Nelinearni odnosi traže posebne postupke, a u užim se područjima često uzimaju približno linearnima.

Dinamička karakteristika regulacijskog člana

Promjene ulaznih i izlaznih veličina ovisne su o vremenu t.





Ovisnost izlazne veličine od ulazne nazivamo *vremenski odziv*

$$x_i(t) = f\,[x_u(t)].$$

Vremenski je odziv za pojedinu vrstu regulacijskog člana karakterističan. U većini slučajeva izražen je diferencijalnom jednadžbom koju jednostavnije rješavamo u obliku prijenosne funkcije P.

Prijenosna funkcija P je odnos među vremenski promjenljivom izlaznom i ulaznom veličinom. Proračunava se pomoću Laplaceove transformacije

$$P(s) = \frac{X_i(s)}{X_u(s)} = \int_0^\infty e^{-st}\,x_i(t)\;dt \,/ \int_0^\infty e^{-st}\,x_u(t)\;dt$$

gdje je s Laplaceova varijabla. Veličine predočene Laplaceovom transformacijom označuju se velikim slovima.

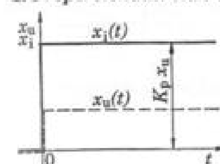
Prijenosna se funkcija P postupno približava koeficijentu pojačanja K.

Vremenski odzivi

Vremenski odzivi prikazuju vremenski tijek izlazne veličine u ovisnosti o nekom vremenskom tijeku ulazne veličine.

Vremenske odzive kod kojih je vremenski tijek ulazne veličine *odskočna* funkcija (»step« funkcija) (kao funkcija $x_u(t)$ na str. 236) nazivamo *prijelaznim funkcijama*. Njihovi su najznačajniji primjeri:

1. *Proporcionalni član* (P)



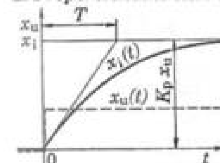


$x_i = K_p\,x_u$

K_p razmjerni faktor pojačanja

Primjeri: poluga, tlak i protok kapljevine u cijevima.

2. *Proporcionalni član s kašnjenjem* – 1. reda (PT_1)



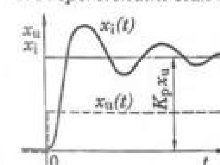


$$T\,\frac{dx_i}{dt} + x_i = K_p\,x_u$$

$$x_i = K_p\,x_u\,(1 - e^{-t/T})$$

Primjeri: temperaturno rastezanje, tlak i protok plina u plinskim cijevnim sustavima.

3. *Proporcionalni član s kašnjenjem* – 2. reda (PT_2)





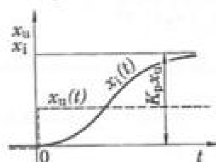
$$T_p^2\,\frac{d^2x_i}{dt^2} + 2\,d\,T_p\,\frac{dx_i}{dt} + x_i = K_p\,x_u$$

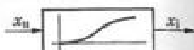
T_p neprigušeno titrajno vrijeme

d faktor prigušivanja (npr. $d_{opt} = 0{,}7$)

Primjer: pneumatski bat s povratnom oprugom.

4. *Proporcionalni član s kašnjenjem* – višeg reda (PT_n)

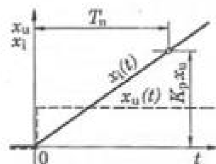




$$T_n^n x_i^{(n)} + \dots T_1 \dot{x}_i x_i = K_p x_u$$

Primjer: regulacija temperature.

5. *Integralni član* (I)



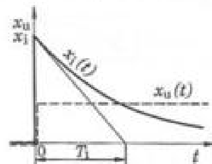


$$x_i = K_I \int x_u \, dt$$

$$K_I = K_p / T_n$$

Primjer: razina kapljevine u posudi.

6. *Derivacijski član s kašnjenjem* (DT_1)

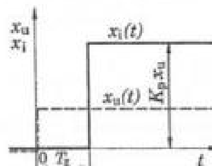


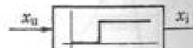


$$T_1 \frac{dx_i}{dt} + x_i = K_p T_D \frac{dx_u}{dt}$$

Primjer: tahogenerator za mjerenje broja okretaja.

7. *Član s mrtvim vremenom bez kašnjenja*





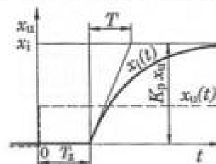
$t < T_z \quad x_i = 0$

$t > T_z \quad x_i = K_p x_u$

T_z mrtvo vrijeme

Primjer: transportna vrpca.

8. *Član s mrtvim vremenom i kašnjenjem*





Primjer: miješanje u posudi, zagrijavanje.

Spajanje regulacijskih članova

Spoj članova u regulacijskim sustavima najlakše se prikazuje prijenosnim funkcijama regulacijskih planova (P), koje su omjer, po Laplaceu transformiranih, izlaznih signala $x_i(s)$ i ulaznih signala $x_u(s)$.

1. *Serijski spoj*

X_u → [P_1] → X_{i1} X_{u2} → [P_2] → X_i = X_u → [$P_1 P_2$] → X_i

$$X_{i1} = X_{u2}$$

$X_{i1} = P_1 X_u \quad X_i = P_2 X_{u2} \qquad X_i = P X_u$

$X_i = P_1 P_2 X_u \qquad P = P_1 P_2$

2. *Paralelni spoj*

X_u → [P_1] → X_{i1}, [P_2] → X_{i2} → (+, ±) → X_i = X_u → [$P_1 \pm P_2$] → X_i

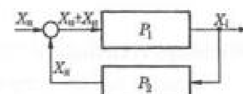
$$X_i = X_{i1} \pm X_{i2}$$

$X_{i1} = P_1 X_u \quad X_{i2} = P_2 X_{u2} \qquad X_i = P X_u$

$X_i = (P_1 \pm P_2) X_u \qquad P = P_1 \pm P_2$

3. *Povratna veza* – temeljni spoj regulacijskih petlji

Na slici: + pozitivna regulacijska petlja
– negativna regulacijska petlja



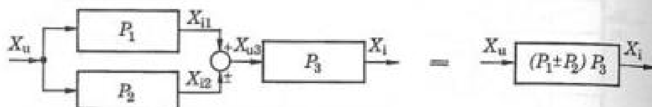
$$X_i = \frac{P_1}{1 \mp P_1 P_2} X_u$$

$$X_i = P_1 (X_u \pm X_R)$$

$$X_R = P_2 X_i$$

U jednadžbi: – pozitivna regulacijska petlja
+ negativna regulacijska petlja

4. *Kombinirani paralelno-serijski spoj*

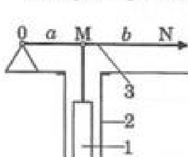


$$X_{u3} = X_{i1} \pm X_{i2}$$

$$X_{i1} = P_1 X_u \qquad X_{i2} = P_2 X_u \qquad X_i = P_3 X_{u3}$$

$$X_{u3} = (P_1 \pm P_2)\, X_u \qquad X_i = (P_1 \pm P_2)\, P_3\, X_u$$

Primjer: mjerni davač temperature



1 – rastezni štap
duljina l_1
temperaturna rastezljivost α_1
2 – plašt
duljina l_2
temperaturna rastezljivost α_2
3 – poluga
krakovi a, b

Promjena temperature		$\Delta T = X_u$
Temperaturno rastezanje	– rasteznog štapa	$\Delta l_1 = X_{i1}$
	– plašta (2)	$\Delta l_2 = X_{i2}$
Pomak poluge (3)	– u točki M	$\Delta l_1 - \Delta l_2 = X_{i1} - X_{i2} = X_{u3}$
	– u točki N	$\Delta s = X_i$

Prijenosne funkcije

$$P_1 = X_{i1} / X_u = \Delta l_1 / \Delta T = l_1 \alpha_1$$

$$P_2 = X_{i2} / X_u = \Delta l_2 / \Delta T = l_2 \alpha_2$$

$$P_3 = X_i / X_{u3} = \Delta s / (\Delta l_1 - \Delta l_2) = (a + b)/a\ .$$

Pomak poluge u točki N – prikaz promjene temperature

$$\Delta s = X_i = (P_1 - P_2)\, P_3\, X_u = (l_1 \alpha_1 - l_2 \alpha_2)\, \frac{a+b}{a} \cdot \Delta T.$$

Mjerenje veličina

Veličine i njihove vrijednosti mjerimo *osjetnicima* (senzorima) koji djeluju neposredno, a to su:
ticala (za duljine i neke druge veličine)
mjerni davači (za većinu veličina).

Regulacijske veličine su većinom samo posredno mjerljive (npr. temperatura iz temperaturnog rastezanja; brzina vrtnje iz centrifugalne sile itd.). Odgovarajući mjerni davači djeluju na raznim načelima: mehaničkom, toplinskom, kontaknom, kapacitivnom, induktivnom itd.

Podatci se dobivaju posredno preračunavanjem iz odgovarajućih izmjerenih veličina (npr. duljinu puta određujemo iz izmjerenog vremena i brzine; učinak iz izmjerenog obavljenog rada i utrošenog vremena; specifični toplinski kapacitet iz izmjerene topline i temperaturne razlike itd.).

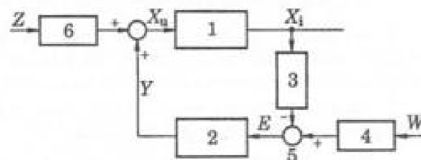
Za daljnju obradbu su naročito podesni signali sljedećih veličina: puta, vremena, sile, tlaka, protoka, električnog napona, električne struje, frekvencije i sl.

Mjerenje mora biti veoma točno, jer regulatori obrađuju vrlo malena odstupanja veličina, tj. razlike između stvarne i željene (poredbene, nazivne, referentne) veličine.

Regulacijska petlja

Povratnu vezu regulacije prikazuje regulacijska petlja.

1 objekt regulacije (staza, proces)
2 regulacijski uređaj
3 pretvarač regulacijske veličine
4 pretvarač nazivne veličine
5 komparator
6 pretvarač poremećajne veličine



Regulirana veličina je izlazna veličina objekta regulacije X_i .
Nazivna veličina je W.

Regulirana i nazivna veličina sustava, mogu biti fizikalno i dimenzijski različite. Da bi se omogućila međusobna usporedba, moraju se signali osjetnika promijeniti u jedinstveni – obično električni – oblik, a to se postiže *pretvaračima*.

U *komparatoru* se mora signal regulirane veličine X_i usporediti promijenjenom nazivnom veličinom W. Njihova je razlika *regulacijsko odstupanje*

$$E = P_4 W_0 - P_3 X_i\ .$$

Regulacijsko odstupanje E je ulazna veličina regulatora; on ga pretvara u izlaznu veličinu Y, a to je *postavna veličina*

$$Y = P_R E = P_2 E$$

gdje je P_R prijelazna funkcija regulacijskog uređaja.

Na sve članove regulacijske petlje mogu uticati vanjski poremećaji a uzimaju se u obzir kao *poremećajna veličina Z*.

Postavna veličina Y i poremećajna Z daju ulaznu veličinu objekta regulacije X_u

$$X_u = Y + P_6 Z.$$

U objektu regulacije se ulazna veličina X pretvara u izlaznu veličinu X_i

$$X_i = P_1 X_u, \qquad X_2 = P_1 (Y + P_6 Z)$$

gdje je P_1 prijelazna funkcija objekta regulacije. Karakteristične veličine objekta regulacije mogu se u većini slučajeva odrediti jedino ispitivanjem.

Regulirana veličina X_i mora postići ili održavati određenu vrijednost nazivne veličine W, a ta može biti:

- konstantna
- da se nakon određenog vremena promijeni
- da slijedi određenu promjenu (npr. puta ili kuta i sl.).

Upravljanje i regulaciju (koji su (općenito) postupci kojim utičemo na ulaznu veličinu X_u na taj način, da izlazne veličine X_i imaju željene vrijednosti) razlikujemo – s obzirom na povratnu vezu:

1. upravljanje nema povratne veze (npr. upravljanje stroja za pranje koje je programom unaprijed obrađeno);
2. regulacija ima povratnu vezu, pričem izlazna veličina može biti:
   - vremenski promjenljiva (npr. alatni stroj koji radi po uzorku
   - vremenski ustaljena (npr. regulacija stalne brzine vrtnje turbine).

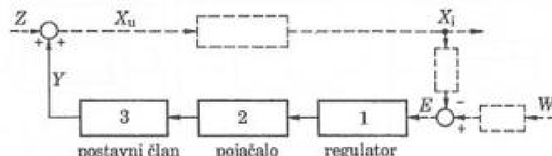
Automatizacija je združivanje niza regulacijskih postupaka s automatskim djelovanjem, koja omogućava vođenje jednostavnih i složenih proizvodnih, energetskih i drugih procesa.

Regulacijski uređaj

Osim mjerenja stvarne vrijednosti regulirane veličine (tj. izlazne veličine iz regulacijskog objekta) X_i određivanja vrijednosti nazivne veličine W, pretvaranje regulirane i nazivne veličine u fizikalno i dimenzijski jednaku veličinu, određivanje regulacijskog odstupanja E s usporedbom regulirane i nazivne veličine, regulacijski uređaj mora obavljati, u najmanju ruku, još i sljedeće funkcije:

1. popravak regulacijskog odstupanja E odgovarajućim *regulatorom*,
2. pojačanje signala – posebno pri regulaciji koja traži velike sile i brzine – *pojačalom*, pri čemu je pomoćna energija električna, hidraulička ili pneumatska,

3. namještanje postavne veličine Y *postavnim članom*.



Ograničavajuće regulacijske naprave spriječavaju – kao sigurnosni uređaji – premašivanje donje i gornje granične vrijednosti regulirane veličine.

Oznake za način djelovanja regulacijske naprave su (DIN 2481):

⊕ – otvaranje pri porastu regulirane veličine
⊖ – otvaranje pri padu regulirane veličine
⌓ – otvaranje pri dosegu gornje granične vrijednosti
◡ – otvaranje pri dosegu donje granične vrijednosti
△ – zatvaranje pri dosegu gornje granične vrijednosti
▽ – zatvaranje pri dosegu donje granične vrijednosti.

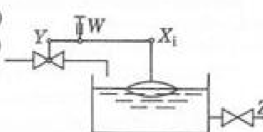
Regulatori

Regulatori su dijelovi regulacijskih naprava koji prerađuju signale regulacijskih odstupanja E kao svoje ulazne veličine.

Regulatori bez pomoćne energije su jeftine naprave, prikladne pri malim izvršnim silama i brzinama. Kod njih utječe regulacijsko odstupanje neposredno na izvršnu naredbu.

Primjer: regulacija razine kapljevine

W udešavanje razine (nazivna veličina)
E pad razine (regulacijsko odstupanje)
Y pomak zapornog ventila (postavna veličina)
Z otjecanje tekućine (poremećajna veličina).



Regulatori s pomoćnom energijom (električnom, hidrauličkom, pneumatskom) djeluju kontinuirano ili diskontinuirano.

Regulatori s kontinuiranim djelovanjem

Kod njih je izlazna veličina Y ovisna o ulaznoj veličini E. Za takve regulatore vrijede zakonitosti regulacijskih članova.

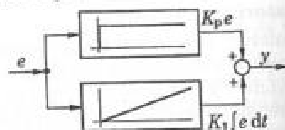
Vrste kontinuirano djelujućih regulatora:

P	I	D
E → y	E → y	E → y
$y = K_P E$	$y = K_I \int E\,dt$	$y = K_D\, dE/dt$
PI	PD	PID
e → y	e → y	e → y
$y = K_P e + K_I \int e\,dt$	$y = K_P e + K_D\, de/dt$	$y = K_P e + K_I\, de/dt + K_D\, de/dt$

Prijelazna funkcija: idealnih regulatora ——— realnih regulatora - - - - - -

Navedene diferencijalne jednadžbe vrijede za idealne regulatore.

Primjer spoja – PI regulatora:

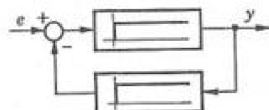


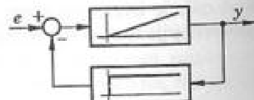
Povratne veze regulatora

Željeno vremensko ponašanje gotovo svih vrsta regulatora postiže se prikladnom povratnom vezom. Na rad regulatora utječe vrsta regulacijskog člana u povratnoj vezi, a to su:

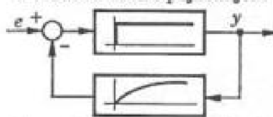
- čvrsta povratna veza: s regulacijskim članom P
- povratna veza s pojačanjem: s regulacijskim članom PT_1
- povratna veza sa prigušenjem (derivacijska): s regulacijskim članom D
- povratna veza s pojačanjem i prigušenjem: s regulacijskim članovima PT_1 i D u serijskom spoju.

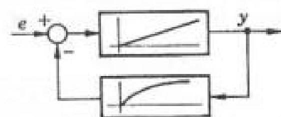
Čvrsta povratna veza



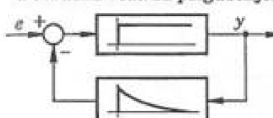


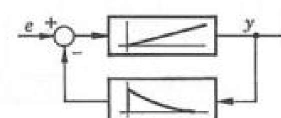
Povratna veza s pojačanjem



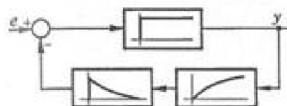


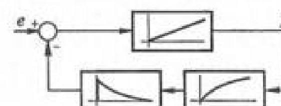
Povratna veza sa prigušenjem





Povratna veza s pojačanjem i prigušenjem





Na sličan se način mogu stvarati najrazličitije kombinacije regulacijskih članova u regulatorima.

Diskontinuirano djelujući regulatori

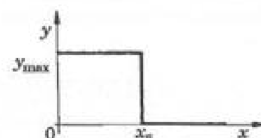
Kod tih regualtora nema kontinuirane ovisnosti među izlaznom i ulaznom veličinom, već je moguć samo ograničen broj izlaznih veličina koje odgovaraju ulaznim veličinama.

Primjer: relejni regulator (npr. bimetalni)

– bez preklopne razlike

$x < x_s \qquad y = y_{max}$

$x > x_s \qquad y = 0$



– s preklopnom razlikom

$x < x_{min} \qquad y = y_{max}$

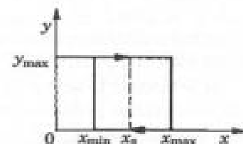
$x > x_{max} \qquad y = 0$

$x = x_{min} \rightarrow x_{max} \qquad y = y_{max}$

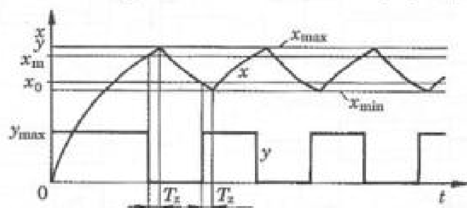
(pri x_{max}: isklapanje)

$x = x_{max} \rightarrow x_{min} \qquad y = 0$

(pri x_{max}: uklapanje)



Vremensko ponašanje diskontinuirano djelujućih regulataora s preklopnom razlikom (uzimajući u obzir vremensko kašnjenje T_z).



Izvršna naredba y izaziva pri vrijednosti y_{max} porast regulirane veličine x. Čim ona dosegne vrijednost x_m, postavna veličina isključuje se do vrijednosti 0; regulirana veličina x raste – uz vremensko zaostajanje T_z – dalje do vrijednosti x_{max}, a tek tada počinje opadati. Pri vrijednosti x_0 postavna veličina se ponovno uklapa do vrijednosti y_{max}, regulirana veličina x i dalje opada te počinje rasti tek nakon vremenskog zaostajanja T_z.

Područja primjene nekih regulacijskih naprava

Veličina	Vrsta regulatora			
	P	I	PI	PID
temperatura	+	–	+	+
tlak	–	+		
protok	–		+	
razina kapljevine	–	–	+	
brzina vrtnje	+	+	++	++
električni napon	+			

*Znakom »+« označeno je prikladno, a znakom »–« neprikladno područje primjene.

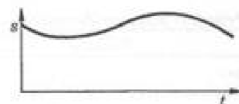
ELEKTRONIČKA OBRADBA PODATAKA

Informacija je vijest o zbivanjima u okolici promatranog sustava i u njemu samom. Vijesti primamo u obliku *podataka* o mjerenjima pojedinih veličina, vezanih na zbivanja, dakle o mjerenjima njihovih vrijednosti i promjena, a u obliku prikladnom za obradbu. Stoga podatci ponajprije sadrže brojčane vrijednosti zbivanja, procesa i tokova. U tu su svrhu označeni znakovima (brojkama, slovima ili posebnim znakovima) ili funkcijama kao matematičkim propisima o vrijednostima.

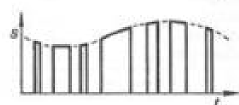
Informatika je grana znanosti i tehnike koja obuhvaća metode i postupke obradbe podataka (dobivenih prvenstveno automatski).

Prijenos podataka označujemo kao *signal*, koji je nosilac informacija. Signali su kontinuirani ili diskretni:

- *kontinuirani signali* teku vremenski neprekidno - u skladu s tijekom veličine o kojoj donose podatke;



- *diskretni signali* nižu se vremenski prekidno (pojedinačno) i množinom impulsa daju podatke o opažanoj veličini.



Za signale se većinom rabi električna struja i napon (ali i put, tlak, toplina, svjetlost itd.). Podatci se prikazuju u ovisnosti o njihovim vremenskim promjenama $I(t)$ i $U(t)$.

Preradba podataka je proces pri kojem se iz ulaznih podataka po određenom preradbenom propisu dobivaju izlazni podatci.

Jednostavni oblik signala je harmonijsko titranje (opisano kružnom frekvencijom i amplitudom).

Podatke obrađujemo elektroničkim računalima koji mogu biti analogni, digitalni ili hibridni. Potonji se sastoje od analognih i digitalnih sastavnih dijelova.

Elektronička računala mogu prerađivati samo one signale podataka koji su izraženi u prikladnom obliku, tj. u prikladnom *kodu*. Stoga valja signale najprije kodirati. Kodirane podatke možemo spremiti (u memorijama). Obrađene podatke treba nato opet dekodirati u uporabivi oblik informacije.



Tehnika automatizacije bavi se oblikovanjem automatski reguliranih procesa u fizikalno-tehničkim sustavima. To postiže ponajprije računalnom tehnikom. U velikom opsegu uporaba također opće priznate metode i način opažanja, karakterističan za kibernetiku (koju je – po općem priznanju – započeo i utemeljio N. Wiener, 1894–1964).

Načelo **analogne tehnike**

Analognim računalima, nazvanim po analognom načelu djelovanja, prikazuju se kontinuirano dva različita fizikalna sustava veličina jednakim matematskim odnosima. Takva je npr. sličnost među mehaničkim i električnim titrajnim sustavom:

mehaničko titranje: $m\ddot{y} + D\dot{y} + ky = F(t)$

električno titranje: $L\ddot{q} + R\dot{q} + 1/C \cdot q = U(t)$

Primjeri analognih veličina

Količine		Protoci			
put	s	brzina	v	=	ds/dt
kut (analitički)	$\hat{\alpha}$	kutna brzina	ω	=	$d\hat{\alpha}/dt$
obujam	V	obujamni protok	q_V	=	dV/dt
masa	m	maseni protok	q_m	=	dm/dt
toplina	Q	toplinski tok	Φ	=	dQ/dt
električni naboj	Q_{el}	električna struja	I	=	dQ_{el}/dt
Potencijalne razlike		**Otpori**			
sila	F	konstanta prigušivanja	d	=	F/v
okretni moment	T, M		d_r	=	M/ω
tlačna razlika	Δp	protočni otpor	η_V	=	$\Delta p/q_V$
temperaturna razlika	ΔT	toplinski otpor	$1/K$	=	$\Delta T/\Phi$
električni napon	U	električni otpor	R	=	U/I
Kapaciteti		**Tromost**			
konstanta opruge	$c = F/s$; $c_r = M/\hat{\alpha}$	masa	m	=	$\frac{F}{dv/dt}$
		moment tromosti	J	=	$\frac{M}{d\omega/dt}$
električni kapacitet	$1/C = U/Q_{el}$	električna induktivnost	L	=	$\frac{U}{dI/dt}$

Analogna računala služe poglavito za simulaciju tehničkih problema.

Bit programiranja analognog računala sastoji se u postavljanju analognog fizikalnog modela kojega treba preoblikovati u matematički model te ga pretvoriti u radni sustav računala.

Za rješavanje posebnih i zapletenih zadataka moraju biti pojedini sastavni dijelovi analognog računala međusobno vezani odgovarajućim redom – analogno fizikalnom procesu.

Analogna računala djeluju kontinuirano (pa se i računane veličine mogu kontinuirano mijenjati). Njihovo je djelovanje brzo pa se stoga mnogo rabe u regulacijskoj tehnici.

Najjednostavnije analogno računalo je opće poznato logaritamsko računalo pri kojem brojeve množimo i dijelimo zbrajanjem i odbijanjem njihovih logaritama (predočenih duljinama).

Načelo digitalne tehnike

U digitalnim su računalima informacije predočene konačnim nizom brojki (*digitus*) kojima zapisujemo brojeve.

U broju ima svaka brojka svoju vlastitu i mjesnu vrijednost s obzirom na izabrani brojčani sustav. Općenito vrijedi za svaki broj X:

$$X = \sum_{i=m}^{-n} N_i B^i$$

gdje je B osnova brojčanog sustava, N brojka u sustavu.

Primjeri:

Decimalni sustav

$B = 10, \quad N = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$

$X = 1987_{10} = 1 \cdot 10^3 + 9 \cdot 10^2 + 8 \cdot 10^1 + 7 \cdot 10^0$

Binarni (dualni) sustav

$B = 2, \quad N = 0, 1$

$X = 10110{,}1_2 = 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-1} = 22{,}5_{10}$

Oktalni sustav

$B = 8, \quad N = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$

$X = 120{,}4_8 = 1 \cdot 8^2 + 2 \cdot 8^1 + 0 \cdot 8^0 + 4 \cdot 8^{-1} = 80{,}5_{10}$

Heksadecimalni sustav

$B = 16, \quad N = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A(10), B(11), C(12), D(13), (14), F(15)$

$X = 20C4_{16} = 2 \cdot 16^3 + 0 \cdot 16^2 + C \cdot 16^1 + 4 \cdot 16^0 = 8388_{10}$

U općoj je uporabi decimalni sustav. Kod digitalnih računala je naročito prikladan binarni sustav, jer tehnički potpuno odgovara stanjima s oznakama:

0 »prolaz otvoren«
1 »prolaz zatvoren«.

Svako od tih dvaju stanja znači 1 *bit* (*binary digit*).

Oktalni i heksadecimalni sustavi namijenjeni su lakšoj predodžbi brojeva.

4-bitni binarni zapis (kod) decimalnih brojki 0 ... 9:

Brojka	Zapis	Brojka	Zapis	Brojka	Zapis
0	0000	4	0100	8	1000
1	0001	5	0101	9	1001
2	0010	6	0110		
3	0011	7	0111		

Primjer zapisa broja 1988: 001 1001 1000 2000.

Matematičke operacije tako zapisanih brojeva uređuje program računala.

Suvremena digitalna računala mogu obaviti više od 10^7 operacija u sekundi.

Preradbu prvenstveno brojčanih podataka rabimo pri regulaciji računalom (*CNC - Computer numeric control*).

Kodiranje digitalnih podataka

Digitalna računala prerađuju digitalne podatke, tj. takve podatke koje možemo označiti samim znakovima. Znakovi proizlaze iz dogovorne skupine znakova, a raspoređeni su u znakovnim nizovima, npr. nizom:

decemalnih brojki (cifara)	0, 1, 2, ...
velikih latiničnih slova	A, B, C, ...
malih latiničnih slova	a, b, c, ...
posebnih znakova	!, ", #, ...

Tako razlikujemo:

brojčane (numeričke) podatke koji se sastoje iz brojki;

slovno-brojčane (alfanumeričke) podatke koji se sastoje iz slova, brojki i posebnih znakova.

Osim ovih znakova postoje i regulacijski znakovi (NUL, ... DEL).

Znakovi za (ISO-) 7-bitne kodove (HRN I.B1.002 – 1982) sastavljeni su iz bitova $b_7 \dots b_1$:

b_7	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	redak Y	stupac X 0	1	2	3	4	5	6	7
→ b_7								0	0	0	0	1	1	1	1
	→ b_6							0	0	1	1	0	0	1	1
		→ b_5						0	1	0	1	0	1	0	1
			0	0	0	0	0	NUL	DLE	SP	0	Ž	P	ž	p
			0	0	0	1	1	SOH	DC_1	!	1	A	Q	a	q
			0	0	1	0	2	STX	DC_2	"	2	B	R	b	r
			0	0	1	1	3	ETX	DC_3	#	3	C	S	c	s
			0	1	0	0	4	EOT	DC_4	$	4	D	T	d	t
			0	1	0	1	5	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
			0	1	1	0	6	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
			0	1	1	1	7	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w
			1	0	0	0	8	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
			1	0	0	1	9	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
			1	0	1	0	10	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
			1	0	1	1	11	VT	ESC	+	;	K	Š	k	š
			1	1	0	0	12	FF	FS	,	<	L	Đ	l	đ
			1	1	0	1	13	CR	GS	–	=	M	Ć	m	ć
			1	1	1	0	14	SO	RS	.	>	N	Č	n	č
			1	1	1	1	15	SI	US	/	?	O	–	o	DEL

U 7-bitnom binarnom zapisu je znak »K« određen nizom bitova: 100 1011, podatak »Srijeda 19,30« zapisom: 101 0011 111 0010 110 0101 110 0100 110 0001 010 0000 011 0001 011 1001 010 1110 011 0011 011 0000.

Znakovi upravljanja u 7-bitnom kodu znače:

ACK	– ACKNOWLEDGE	– potvrda ispravnog primitka
BEL	– BELL	– alarm
BS	– BACKSPACE	– pomakni natrag
CAN	– CANCEL	– poništiti
CR	– CARRIAGE RETURN	– pomak nosača natrag
DC	– DEVICE CONTROL	– kontrola uređaja
DEL	– DELETE	– izostaviti
DLE	– DATA LINK ESCAPE	– slijedi znak posebnog značenja
EM	– END OF MEDIUM	– konac medija
ENQ	– ENQUIRY	– upit
EOT	– END OF TRANSMISSION	– konac prijenosa
ESC	– ESCAPE	– prijelaz
ETB	– END OF TRANSMISSION BLOCK	– konac prijenosa bloka
ETX	– END OF TEXT	– konac teksta
FF	– FORMAT FEED	– određivanje pozicije
FS	– FILE SEPARATOR	– odvajanje datoteka
GS	– GROUP SEPARATOR	– odvajanje blokova
HT	– HORIZONTAL TABULATION	– horizontalno tabuliranje
LF	– LINE FEED	– određivanje pozicije na sljedeću liniju
NAK	– NEGATIVE ACKNOWLEDGE	– potvrda neispravnog primitka
NUL	– NULL	– prazan znak
RS	– RECORD SEPARATOR	– odvajanje slogova
SI	– SHIFT-IN	– povratak na normirano značenje
SO	– SHIFT-OUT	– nailazak znakova s promijenjenim značenjem
SOH	– START OF HEADING	– početak zaglavlja
SP	– SPACE	– razmak
STX	– STRT OF TEXT	– početak teksta
SUB	– SUBSTITUTE CHARACTER	– zamijeniti
SYN	– SYNCHRONOUS IDLE	– sinkronizacija
US	– UNIT SEPARATOR	– odvajanje polja
VT	– VERTICAL TABULATION	– vertikalno tabuliranje

Logičko zaključivanje

Booleova logička algebra služi se skupom od dva elementa: 0 (krivo) i 1 (pravilno).

Elementarne funkcije Booleove algebre

Funkcija	Simbol	Funkcija	Simbol	Funkcija	Simbol
NE (NO)	$\overline{\ \ }$			implikacija	$\supset$
ILI (OR)	$\vee$	NE-ILI (NOR)	$\overline{\vee}$	ekvivalencija	$\equiv$
I (AND)	$\wedge$	NE-I (NAND)	$\overline{\wedge}$	antivalencija	$\not\equiv$

Pomoću elementarnih funkcija Booleove algebre možemo u načelu prikazati svaku logičku kombinaciju.

Booleove funkcije

a b	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$a \vee b$	$a \wedge b$	$a \overline{\vee} b$	$a \overline{\wedge} b$	$a \supset b$	$a \equiv b$	$a \not\equiv b$
0 0			0	0	1	1	1	1	0
0 1	1	0	1	0	0	1	1	0	1
1 0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
1 1			1	1	0	0	1	1	0

Pohranjivanje podataka

Kodirane podatke možemo pohraniti u memorijama i to za stalno (za što su prikladne bušene kartice i trake) ili s mogućnošću mijenjanja (što omogućuju magnetne memorije).

Bušene kartice i trake rabe se za jendokratnu snimku podataka. Na njih bušenjem zapisujemo dva stanja: 0 – nebušeno i 1 – bušeno.

Bušena kartica (od kartona bez električki vodljivih dijelova, veličine 187,32 × 82,55 mm) obično je podijeljena: po visini na 10 normalnih redaka (0...9) i na dva dodatna retka; po duljini npr. na 45, 80 ili 90 stupaca. Svaki stupac pripada jednom kodiranom znaku, a svaki redak u stupcu jednom bitu (0 ili 1).

Bušene trake su na veliku duljinu razvučene kartice sa stupcima u razmaku po 2,5 mm i recima, razvučenima u nizove, a njihov broj mora odgovarati uporabljenom kodu. Na presjecištima stupaca i redaka su mjesta za rupice. Između redaka je niz manjih rupica za prijenos trake.

Magnetne memorije iskorišćuju magnetna svojstva vrlo tankih (≈ 11 μm) feromagnetnih slojeva (NiFe, NiCo itd.), nanesenih na nosivu podlogu. Te slojeve možemo lokalno (točkasto) magnetizirati i to u dva suprotna magnetna stanja, što odgovara – nalik na bušenje – stanjima 0 i 1.

Magnetne memorije razlikujemo po nosivoj podlozi:

Magnetne kartice su od plastične umjetne tvari, npr. 80 × 350 mm.

Magnetne trake su također od plastičnih umjetnih tvari (debljine ≈ 50 μm), mnogo su uže od kartica (npr. 3 ... 12 mm), ali znatno dulje (npr. 750 m). Brzina odvijanja je npr. 1,7 m/s.

Magnetni bubnjevi su od slitina lakih kovina (promjera 500 ... 1000 mm), sadrže i do 10^7 znakova. Njihova prijenosna brzina iznosi 10^6 bit/s.

Magnetni koluti (diskovi) (promjera 500 ... 1500 mm) koriste za smještaj znakova obje strane i stoga zauzimaju – uz isti kapacitet – znatno manji prostor od bubnjeva. Obično je 6 ... 12 koluta skupljeno u izmjenjivi kolutni slog. Mali magnetni koluti (diskete) (promjera 80 ... 250 mm) imaju kapacitet do $1{,}6 \cdot \times 10^6$ bit/s.

Druge izvedbe magnetnih memorija su:

Keramičke ploče s magnetnim slojem (NiFe) koji je u vakuumu parom nanesen u debljini od samo $(2 \ldots 20) \cdot 10^{-2}$ μm.

Magnetne obručne jezgre, prešane od feromagnetnih tvari (u obruče pravokutnog presjeka). Strujnim udarom preklapaju se iz jednog u drugi magnetni smjer.

U magnetnim memorijama spremljeni podaci mogu se – po želji – brisati odnosno zamjenjivati.

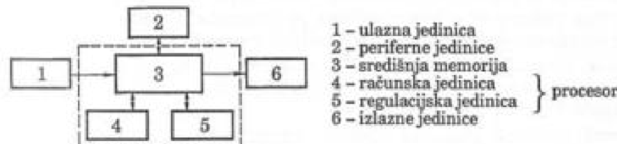
Aparaturna oprema

Aparaturnu opremu čine električni (elektronički) i mehanički sklopovi. Pri obradbi podataka u njima se ređaju određene serijske operacije.

Podatke i naredbe predstavljaju u digitalnim računalima binarni znakovi koji su obično združeni u riječima stalne duljine (4, 6, 8 = 1 bajt (byte), 12, 16, 32, 48, 60, 64 i više bitova). Podatci i naredbe prerađuju se u pojedinim jedinicama računala u elektroničkim spojevima koji su sastavljeni od logičkih (poluvodičkih) elemenata, funkcionalno vezanih (u velikoj gustoći) na malim pločicama – *čipovima (chip)*. Broj u čipu združenih elemenata označuje se »integracijskim brojem«.

Broj elemenata	Vezivanje			
10 ... 100	SSI	*(Small Scale Integration)*	rijetka	gustoća
50 ... 500	MSI	*(Medium Scale Integration)*	osrednja	
> 1000	LSI	*(Large Scale Integration)*	velika	
> 10000	VLSI	*(Very Large Scale Integration)*	vrlo velika	

Osnovni sastav digitalnog računala



Ulazna jedinica prima podatke i naredbe korisnika (čitač, tastatura ...).

Periferne jedinice obuhvaćaju procesne jedinice (procesnu periferiju, periferne memorijske jedinice: memorijske kartice, vrpce, kolute, bubnjeve).

Središnja memorija sprema informacije-podatke i naredbe. Karakterističan je za nju kapacitet za spremanje informacija (jedinica kapaciteta

središnje memorije je 1 kilobajt = 2^{10} = 1 024 riječi) te brzina za njihovo unošenje i crpljenje.

Računska jedinica obavlja sve zahtijevane operacije:

aritmetičke operacije (zbrajanje, odbijanje, množenje, dijeljenje)

logične operacije – uspoređivanje ($>$, $\geq$, $=$, $\leq$, $<$, $\neq$) i odlučivanje

organizacijske operacije (prijenos podataka i naredbi među funkcijskim jedinicama računala).

Regulacijska jedinica dirigira izvođenje naredbi po programu. Računska i regulacijska jedinica zajedno sačinjavaju *procesor*.

Izlazne jedinice (tiskač, »plotter« ekran ...) predaju korisniku rezultate računala.

Digitalna računala rabe se za rješavanje svih zadataka koji se mogu oblikovati u programima.

Programska oprema

Digitalno računalo je automat u kojem teku informacijski procesi po točno određenim uputama.

Program je potpuni niz uputa za rješavanje danog zadatka. Te upute sadrže računske naredbe za aritmetičke operacije, usporedbene naredbe za logičke operacije itd.

Programi za korijene i eksponente, trigonometrijske i druge funkcije koje se javljaju u praksi veoma često, mogu se – posebno izrađeni – spremati i po potrebi uključiti u drugi program kao potprogram.

Izradba programa ovisna je o strukturi i izvedbi elektroničke naprave za preradbu podataka (računala).

Algoritam je temelj programa te je takav popis svih uputa kojima se omogućuje rješenje određenog zadatka po koracima. U njem su pojedini koraci određeni tako, da ih računalo može »razumjeti« i izvesti, tj.:

– svaki algoritam sastoji se iz više pojedinih koraka, a svaki korak iz računskih propisa koji predstavljaju neku funkciju; svaki korak sadrži usto upute za sljedeći korak;

– svaki je korak algoritma izvedljiv jednoznačno, a isto tako jednoznačan je i nastavak;

– funkcija svakog koraka mora biti izvodljiva, čime je osigurano, da je s konačnim brojem elementarnih operacija ostvarljiva svaka funkcija.

Programski jezik oblikuje skup svih uputa za opis algoritama.

Programski su jezici:

– strojno orijentirani, tj. sastoje se iz uputa koje imaju jednaki ili slični sastav kao i naredbe određenog računala;

– problemsko orijentirani, tj. po svom su sastavu prikrojeni problemima koje treba rješavati, a nisu ovisni o uređaju računala.

Nalik na materijalne proizvode, nastaje i programski izradak u više faza od kojih su najznačajnije:

– specifikacija, tj. određivanje uporabnih funkcija ulaznih i izlaznih podataka

– planiranje: program se dijeli na programske module (pojedine komponente većih programa)

– izvedba: moduli se dalje detaljiraju i kodiraju (zapisuju u određenom programskom jeziku).

S porastom kompliciranosti zadataka rastu i troškovi za programsku opremu.

Naprave za elektroničku obradbu podataka mogu obaviti samo osnovne računske operacije i određene usporedbe po kojima moraju biti izgrađeni algoritmi.

Jednostavni zadatci rješavaju se jednostavnom jednadžbom. Za zadatke iz prirodoslovlja i tehnike često su potrebni sustavi diferencijalnih jednadžbi. Za algoritme je karakteristično stoga, da se složeni zadatci rješavaju korakom, putem jednostavnih operacija.

Dijagram toka programa je računska shema kojom je dan cjelokupan tok algoritma (programskog niza). Pojedine korake upisujemo u odgovarajuće okvire (blokove), međusobno ih povežemo i ucrtamo smjer toka. Dijagram toka račva se samo pri odluci da – ne.

Simboli za dijagrame odvijanja operacija programa (HRN A.F0.004 – 1971)

▭	Operacija općenito	⬡	Modifikacija programa	———	Linija odvijanja programa
◇	Odluka	⏷	Ručna operacija	○	Priključna točka
▥	Potprogram	▱	Ulaz/izlaz	⬭	Granično mjesto

Simboli za dijagrame protoka podataka i dokumenata

Obradba općenito	Ulaz/izlaz	Magnetni disk
Pomoćna funkcija	Memorija ovisna od postrojenja	Matrična memorija
Ručna operacija	Memorija odvojena od sustava	Ilustrirani izlaz
Ručno unošenje	Dokument	Linija protoka podataka
Združivanje	Bušena kartica	Transport nosača podataka
Razlučivanje	Bušena vrpca	Telekomunikacijska veza
Združivanje/ /razlučivanje	Magnetna vrpca	Povezivanje
Sortiranje	Magnetni bubanj	Napomena

Primjer: kvadratna jednadžba $ax^2 + bx + c = 0$

Analitičko rješenje: $x_{1,2} = -\frac{b}{2a} \pm \frac{1}{2a}\sqrt{b^2 - 4ac}$

Algoritam:

Korak 1 [$a = 0$?] da: prijelaz na korak 2
ne: prijelaz na korak 5

Korak 2 [$b = 0$?] da: prijelaz na korak 3
ne: prijelaz na korak 4

Korak 3 [$c = 0$?] da: jednadžbu zadovoljava svaki x
ne: jednadžba je protuslovna

Korak 4: Izračunati $x = -c/b$; konac računa.

Korak 5 Izračunati $d = b^2 - 4\,ac$; prijelaz na korak 6

Korak 6 [$d = 0$?] da: prijelaz na korak 7
ne: prijelaz na korak 8

Korak 7 Izračunati $x = -b/2a$; konac računa

Korak 8 Izračunati $e = \sqrt{|d|}$; prijelaz na korak 9

Korak 9 [$d > 0$?] da: prijelaz na korak 10
ne: prijelaz na korak 11

Korak 10 Izračunati $x_{1,2} = (-b \pm e)/2a$; konac računa

Korak 11 Izračunati $x_{1,2} = (-b \pm ei)/2a$; konac računa.

Dijagram toka programa:

Programski jezici

Svaki je programski jezik (tj. skup uputa za opis algoritma) jednoznačno sastavljen po određenoj »gramatici«. Znakovi – kao elementi jezika - određeni su odabranim nizovima (brojkama, slovima, posebnim znakovima, simbolima za riječi).

Programskih jezika ima vrlo mnogo. Posebno važni su sljedeći:

ADA (*nazvan po »prvoj programerki« Augusti Adi Byron*) je jezik za programiranje u prirodoslovlju i tehnici. Normiran u SAD 1983. g.)

ALGOL (*ALGOrithmic Language)* rabi se za prikaz računskih propisa, a naročito za rješavanje numeričko-matematičkih, prirodoslovnih i tehničkih problema.
(Početak razvoja: 1958 - ALGOL 58; nato ALGOL 60-68. Normrian u: ISO/R 1538 i DIN 66026.)

APL (*A Programming Language*) služi za opis algoritama. (Početak razvoja: 1957. Prvi puta uporabljen za računala IBM 360.)

APT (*Automatically Programed Tools*) namijenjen tehnologiji obradbe. Iz njega su se razvili posebni jezici: EXAPT 1 – za obradbu bušenjem,

EXAPT 2 – za obradbu tokarenjem, EXAPT 3 – za obradbu glodanjem. (Nastao je 1957. g. Normiran je po DIN 66025 – za sastavljanje programa za računalom upravljane alatne strojeve za odvajanje čestica.)

BASIC (*Beginner's All purpose Symbolic Instruction Code*) prikrojen je u prvom redu za probleme prirodoslovlja i tehnike. Veoma je rasprostranjen pri malim osobnim računalima. Normiran u SAD 1978. g.)

COBOL (*COmmon Business Oriented Language*) služi za potrebe trgovine i računovodstva. Normiran po ISO/R 1989. i DIN 66028.)

FORTRAN (*FORmular TRANslating system*) rabi se prvenstveno za programiranje problema iz prirodoslovlja i tehnike, a uporabljiv je i na komercijalnom području.
(Početak: 1954., daljnji razvoj: FORTRAN 77. Normiran po ISO/R 1539, DIN 66027.)

PASCAL (*imenovan po francuskom matematičaru*) služi za rješavanje numeričkih i nenumeričkih problema. (Postanak: 1969. g. na ETH, Zürich.)

PL 1 (*Programming Language 1*) uporabljiv za višenamjensku primjenu. Normiran po ISO/R 6160 i DIN 66225.)

PROLOG (*PROgramming in LOgic*) razvijen je za potrebe umjetne inteligencije. (Početak: 1972. g., Marseille.)

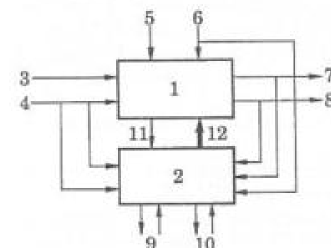
Ostali su programski jezici:
CORAL, FORMAC, GPSS, LISP, LTR, PEARL, REDUCE, RPG, RTL, SNOBOL, SYMAP itd.

Procesna računala

Procesna računala (procesori) su naprave za elektroničku obradbu podataka pri raznim tehničkim procesima.

Razvoj tehnologije poluvodiča omogućio je izradbu računala znatno manjeg obujma (i cijene) – miniračunalo i mikroračunalo. U njima je na vrlo maloj površini skupljeno mnogo tisuća sastavnih elemenata (npr. 20 000 jednopolnih tranzistora na čipu ploštine od 35 mm^2).

Mikroprocesori – procesna mikroračunala – većim su dijelom sastavljeni i programirani za određenu svrhu.



1 – proces
2 – procesor
3 – sirovina
4 – energija
5 – nemjerljive smetnje
6 – mjerljive smetnje
7 – proizvod
8 – sporedni i otpadni materijal
9 – tražene informacije
10 – informacije s drugoga računala
11 – informacije iz procesa
12 – izvršna naredba

Procesor dobiva (stalno ili u određenim vremenskim razmacima) informacije o ulaznim veličinama (sirovinama i energiji), o tijeku proizvodnog procesa (i mjerljivim smetnjama) te o izlaznim veličinama (proizvodu te o sporednim i otpadnim tvarima). To su analogni signali koji se u pretvaračima pretvaraju u digitalne signale. U procesoru se uspoređuju mjerni podaci sa željama. U skladu s ustanovljenim odstupanjima procesor nato utiče neposredno na proces.

Pomoć računala

Brzina, točnost i preglednost rada s računalom su uzroci za sve opsežniji rad u tehnici pomoću računala. Tako su se razvili značajni radni sustavi vođeni računalom:

CAD (*Computer Aided Design*) za konstruiranje (planiranje)
CAM (*Computer Aided Manufacturing*) za izradbu (proizvodnju)
CAE (*Computer Aided Engineering*) za optimiranje izradaka (proizvoda)
CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) za sastavljenu (integriranu) izradbu
CAP (*Computer Aided Programming*) za programiranje (planiranje rada)
CAQ (*Computer Aided Quality Ensurance*) za osiguranje kvaliteta
itd.

DRUGI DIO

ISPITIVANJE TVARI

DIJAGRAM σ, ε

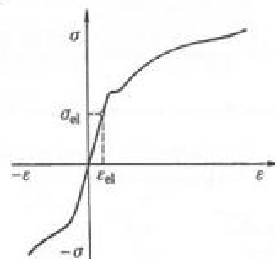
U epruveti opterećenoj silom F, nastupaju naprezanja σ koja izazivaju produljenje ΔL.

Naprezanje σ je odnos sile F i površine presjeka epruvete S (okomito na smjer sile)
$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

Zbog djelovanja sile F (i time nastalim naprezanjem σ) epruveta će se s početne duljine L_0 rastegnuti na duljinu L.

Produljenje je epruvete $\Delta L = L - L_0$.

Relativno produljenje (istezanje) epruvete je produljenje s obzirom na početnu duljinu L_0
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}.$$



Dijagram σ, ε pokazuje međusobnu ovisnost naprezanja i istezanja.

Početno je rastezanje linearno (tj. istezanje je upravno razmjerno naprezanju). U području linearnoga rastezanja tvar je *elastična* (tj. nakon prestanka djelovanja sile odn. naprezanja vraća se na početnu izmjeru).

Modul elastičnosti E je odnos naprezanja i istezanja (u području elastičnosti)
$$E = \frac{\sigma_{el}}{\varepsilon_{el}}$$

»Granica elastičnosti« je naprezanje pri kojem osjetljiva mjerila osjete prvo primjetno, trajno, produljenje tvari (pri još nepromijenjenom presjeku $S = S_0$)[1]. Nakon te granice (obično na koncu linearnoga rastezanja) tvar se rasteže *plastično* (tj. nakon prestanka djelovanja sile ne vraća se više na početnu izmjeru, već ostaje određeno, trajno produljenje, a presjek se suzuje: $S < S_0$).

Dijagram σ, ε nastavlja se u smjeru tlačnih naprezanja, kad tlačno naprezanje $-\sigma$ izaziva relativno skraćenje $-\varepsilon$.

---

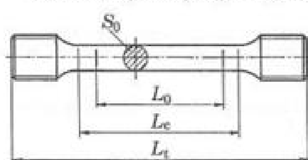
[1] Tj. konvencionalna granica razvlačenja $R_{p\,0{,}01}$ – v. str. 356.

ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA TVARI (HRN C.A4.001 – 1986)

Vlačno ispitivanje (HRN C.A4.002 – 1985) (ISO 6802 – 1984)

Za vlačno ispitivanje rabimo epruvete raznih oblika s obzirom na veličinu i oblik raspoložive tvari i s obzirom na zahvatne čeljusti kidalice.

Oznake duljina i presjeka epruvete





L_t – ukupna duljina epruvete
L_c – duljina ispitnog dijela epruvete
L – mjerna duljina*
L_0 – početna mjerna duljina*
L_u – konačna mjerna duljina (nakon kidanja)*
S – površina poprečnog presjeka epruvete
S_0 – početna površina presjeka
S_u – najmanja površina presjeka (nakon kidanja)

* Pri uporabi ekstenzometra:
L_e – mjerna duljina mjerača produljenja (ekstenzometra)
L_{e0} – početna mjerna duljina mjerača
L_{eu} – mjerna duljina mjerača nakon kidanja

Izmjere epruveta

Početna mjerna duljina L_0 proporcionalne epruvete razmjerna je korijenu površine početnog presjeka S_0: $L_0 = k\sqrt{S_0}$ pa je epruveta okrugla presjeka proporcionalna promjeru: $L_0 = k\sqrt{S_0} = k\sqrt{\frac{\pi}{4}}\cdot d_0$.

Uobičajene početne duljine L_0 su:

	za proporcionalne epruvete:		za presjek epruvete:	
	k	$k\sqrt{\pi}/4$	proizvoljni	okrugli
kratka	5,65	5	$L_0 = 5{,}65\sqrt{S_0}$	$L_0 = 5\,d_0$
duga	11,3	10	$L_0 = 11{,}3\sqrt{S_0}$	$L_0 = 10\,d_0$

Primjeri kratkih epruveta:

$\frac{d_0}{\text{mm}}$	$\frac{S_0}{\text{mm}^2}$	$\frac{L_0}{\text{mm}}$	$\frac{L_c}{\text{mm}}$
20 ± 0,150	314	100 ± 1,0	110
10 ± 0,075	78,5	50 ± 0,5	55
5 ± 0,040	19,6	25 ± 0,25	28

Početna mjerna duljina L_0 neproporcionalne epruvete nije ovisna o presjeku S_0 (odn. promjeru d_0).

Epruvete za žice i štapove, promjera do 4 mm moraju imati početnu mjernu duljinu $L_0 = 200 \pm 2$ mm ili $L_0 = 100 \pm 1$ mm.

Epruveta za limove i trake, debljine 0,1 ... 3 mm izrezuju se na širine b (12,5 odn. 20 mm), s početnom mjernom duljinom L_0 (50 ... 80 mm) i ispitnim duljinama L_c (75 odn. 120 mm).

Oznake veličina pri rastezanju i sužavanju

Pri rastezanju vrijede oznake:

ΔL	$= L - L_0$	mm	– produljenje
ΔL_u	$= L_u - L_0$	mm	– produljenje nakon kidanja
ε	$= (\Delta L/L_0)\cdot 100$	%	– relativno produljenje (istezanje)
A	$= (\Delta L_u/L_0)\cdot 100$	%	– relativno produljenje nakon kidanja (istezljivost).

Oznaka A vrijedi za relativno produljenje nakon kidanja u slučaju uporabe proporcionalne epruvete s vrijednošću koeficijenta $k = 5{,}65$. Pri uporabi proporcionalnih epruveta s drugim koeficijentom k (npr. 11,3), valja oznaci A dodati tu vrijednost kao indeks (npr. $A_{11,3}$). Pri proporcionalnim epruvetama okruglog presjeka označena je istezljivost za:

- kratke epruvete A_5
- duge epruvete A_{10}.

Pri uporabi neproporcionalnih epruveta, početne mjerne duljine L_0 (npr. $L_0 = 80$ mm), treba oznaci A dodati kao indeks vrijednost početne mjerne vrijednosti (npr. A_{80}).

Pri sužavanju presjeka vrijede oznake:

ΔS	$= S_0 - S$	mm²	– suženje poprečnog presjeka
ΔS_u	$= S_0 - S_u$	mm²	– najveće suženje (nakon kidanja)
ψ	$= (\Delta S/S_0)\cdot 100$	%	– relativno suženje
Z	$= (\Delta S_u/S_0)\cdot 100$	%	– relativno suženje nakon kidanja (kontrakcija)

Oznake sila i nazivnih naprezanja

Dijagram sile F u ovisnosti o produljenju ΔL snimamo neposredno na kidalici

F (vlačna) sila

F_m najveća sila.

Pri određivanju najveće sile F_m mora brzina razmicanja čeljusti kidalice iznositi $\leq L_c$ mm/min (L_c u mm).



Dijagram F, ΔL

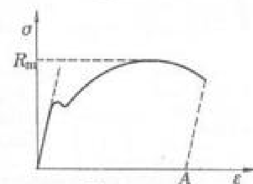
*

Nazivna naprezanja R iskazana su silom F, dijeljenom s početnim presjekom S_0.

U dijagramu σ dana su nazivna naprezanja R u ovisnosti o relativnom produljenju ε, sukladno s dijagramom sile F u ovisnosti o produljenju ΔL.

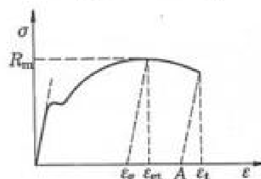
$\sigma = F/S_0$ (vlačno) naprezanje

$R_m = F_m/S_0$ (vlačna) čvrstoća.



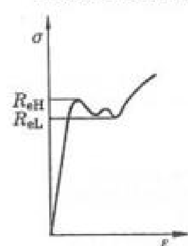
Dijagram σ, ε

Značajna relativna produljenja



ε_{gt} ukupno relativno produljenje pri najvećoj sili
ε_g relativno produljenje pri najvećoj sili
ε_t ukupno relativno produljenje u trenutku kidanja
A relativno produljenje nakon kidanja (istezljivost)

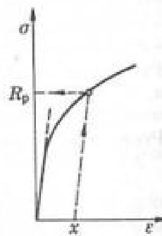
Granice razvlačenja



Granice razvlačenja R_e
gornja R_{eH}
donja R_{eL}
(npr. kod mekih čelika)

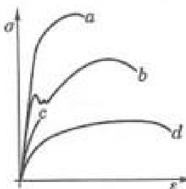
U dijagramu σ,ε povučemo iz (odabrane) točke x na apscisi paralelu s početnim (linearnim) dijelom krivulje rastezanja. Presjek paralele s krivuljom rastezanja (sl. desno) određuje konvencionalnu granicu razvlačenja pri relativnom produljenju $\varepsilon = x$ %, npr.

$R_{p\,0{,}01}$ pri $\varepsilon = 0{,}01$ % [1)]
$R_{p\,0{,}02}$ pri $\varepsilon = 0{,}2$ % [2)]
R_{p1} pri $\varepsilon = 1$



Konvencionalna granica razvlačenja R_p (za tvari s kontinuiranim rastezanjem)

*



a tvrdi čelik
b meki čelik
c sivi lijev
d bakar

Tijek rastezanja u ovisnosti od naprezanja je za razne tvari različit i za njih karakterističan. Tako po obliku dijagrama σ, ε možemo razlikovati:

Žilave tvari se nakon početnog elastičnog (linearnog) rastezanja rastežu do prekida vrlo plastično, i to kontinuirano (npr. bakar) ili diskontinuirano s pojavom tečenja pri stalnom naprezanju (npr. meki čelik).

Krhke tvari se po početnom elasatičnom rastezanju kidaju bez (značajnijeg) plastičnog rastezanja (npr. sivi lijev).

Plastične tvari se rastežu samo neznatno elastično (npr. olovo) ili su gotovo neelastične (npr. asfalt).

1) To je »tehnička granica elastičnosti«.
2) Dosad zvana »granica plastičnosti«.

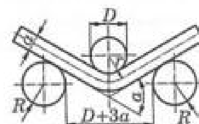
Ispitivanje savijanjem (HRN C.A4.0085 – 195), (ISO 7438 – 1985)

Epruvete imaju pravokutni, kvadratni ili okrugli presjek, a ispituju se i čitavi profili. Ukoliko nije drugačije određeno, debljina epruvete a mora biti manja od 30 mm a širine b:

za $a < 3$ mm $b = 20 \pm 5$ mm
za $a \geq 3$ mm $b = 20 \ldots 50$ mm

Za savijanje rabe se dva valjkasta oslonca

$$l = (D + 3a) \pm \frac{a}{2}$$



s polumjerima R:

za $a \leq 12$ mm $R = 25$ mm
za $a > 12$ mm $R = 50$ mm.

Promjer D valjka kojim savijamo uzorak uzima se prema posebnim propisima za ispitivanu tvar.

Savijanje mora biti polagano i neprekidno do određenog kuta savijanja α, odnosno do pojave prvih pukotina na vanjskoj strani uzorka.

Savojna čvrstoća sivog lijeva ispituje se na sirovim ili obrađenim uzorcima u obliku posebno odljevenih ravnih okruglih štapova promjera d_0, koje oslanjamo na dva valjkasta oslonca s razmakom l (između osi oslonaca promjera D), a u sredini ih opterećujemo silom F do prekida. Čvrstoća sivog lijeva na savijanje R_{ms} slijedi iz najveće sile F_{max} pri lomu

$$R_{ms} = F_{max}\, l / 4\, W \qquad W = \pi\, d_0^3/32 \approx 0{,}1\, d_0^3\,.$$

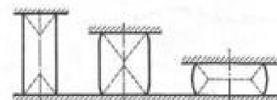
Izmjere epruveta i uređaja (HRN C.A4.014 – 1973)

Promjer epruvete d_0 / mm	Duljina epruvete L / mm	Oslonci promjer D / mm	Oslonci razmak l / mm	Polumjer pritiskivača r / mm
13	300	20 ... 30	260	10 ... 15
20	450	50 ... 60	400	25 ... 30
30	650		600	
45	1 000		900	

Tlačno ispitivanje (HRN C.A4. 006 – 1954)

Za tlačni pokus rabi se epruveta koja je za kovine redovito okruglog presjeka, promjera d_0 i visine $h_0 = 2d_0$ (izuzetno je $h_0 = d_0 \ldots 3d_0$). Za nekovine uzorak je obično kocka.

Uzorak se tlači lakim i čestim udarcima čekića ili tlačila. Pri tome se pojavljuje »tlačni stožac« po kojem se tvar širi ustranu. Uzorak se tlači do određene visine (u hladnom stanju do $h_0/2$, u vrućem stanju do $h_0/3$), odnosno do pojave bočnih pukotina.



Ispitivanje žica uvijanjem (HRN C.A4.016 – 1986), (ISO 7800 – 1986)

U posebnom uređaju sučemo žicu oko vlastite osi do loma. Da bi žica pritom ostala ravna, opterećujemo je vlačnom silom koja u žici ne smije izazvati naprezanje veće od 2 % čvrstoće čelične žice, odnosno 5 % čvrstoće žice od neželjeznih kovina. Slobodna duljina žice l i najveća brzina sukanja n iznose:

promjer žice d (mm)	0,3 ... (1	1 ... (1,5	1,5 ... (3	3 ... (5	>5
slobodna duljina l	200 d	100 d	100 d	100 d	50 d
brzina sukanja n (s^{-1})					
– za čelik	3	1	1	1	0,5
– za Cu i Cu-slitine	5	2	1,5	1	0,5

Broj okretaja žice do loma mjera je njene sposobnosti pri ispitivanju uvijanjem.

Ispitivanje žica izmjeničnim pregibanjem (HRN C.A4.018 – 1986), (ISO 7801 – 1984)

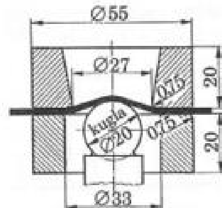
Ispitivani komad žice stegnemo u pokusnu napravu u kojoj je pregibamo naizmjence u jednu i drugu stranu do njezina loma.

Mjerne su značajke pokusne naprave:

d mm	D mm	h mm	d mm	D mm	h mm
0,3 ... 0,5	2,5	15	2,0) ... 3,0	15,0	25
0,5) ... 0,7	3,5	15	3,0) ... 4,0	20,0	35
0,7) ... 1,0	5,0	15	4,0) ... 6,0	30,0	50
1,0) ... 1,5	7,5	20	6,0) ... 8,0	40,0	75
1,5) ... 2,0	10,0	20	8,0) ... 10,0	50,0	100

Žicu pregibamo preko valjaka od kaljenog čelika. Jednim pregibom smatramo savijanje iz početnog (srednjeg) položaja za 90° u jednu stranu i natrag do početnog položaja (a obavljamo g u 1 s). Broj pregiba do prekida žice mjera je sposobnosti žice za izmjenično pregibanje.

Ispitivanje žica navijanjem (HRN C.A4.019 – 1986), (ISO 7802 – 1983).



Ispitivanje sposobnosti za duboko vučenje (HRN C.A4.021 – 1962), (ISO 8490 – 1986).

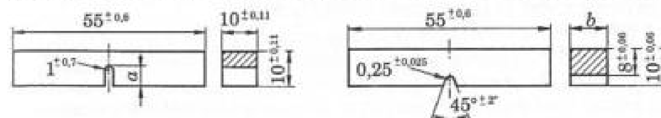
Sposobnost tvari za duboko vučenje ispituje se utiskivanjem čelične kuglice u limenu epruvetu.

Za limove i trake debljine do 2 mm služi naprava po Erichsenu, sastavljena od kaljene čelične kuglice za utiskivanje, matrice i držača limenog uzorka.

Kuglica se polagano i jednolično (približe brzine 0,1 mm/s) utiskuje u uzorak do pojave prvih pukotina. Kao mjera sposobnosti tvari za duboko vučenje navodi se postignuta dubina.

Ispitivanjem udarom po Charpyju

Za ispitivanje po metodi Charpyja rabe se zarezne epruvete. Tim se postupkom određuje žilavost tvari pri udaru (s obzirom na utjecaj zareza).



Epruveta s U-zarezom (HRN C.A4.004 – 1984) (ISO 83-1976)

Epruveta s V-zarezom (HRN C.A4.025 – 1984) (ISO 148 – 1983)

a = 5 mm – normalno; a = 3 (2) mm – plitki zarez } ± 0,09 mm

b = 10 mm – normalno; b = 7,5 (5) mm – uski uzorak } ± 0,11 mm

Epruveta se prelama batom koji padom udari u sredinu epruvete, poduprte na oslonce.

Udarna energija bata

$$F_g h_1 = 300\ (150,\ 100)\ \text{J}.$$

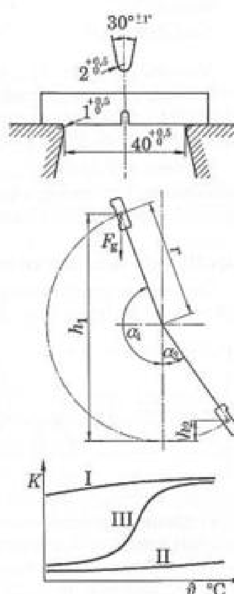
Udarna radnja loma bata težne sile F_g koji pada s visine h_1 te dospije pri lomu na visinu h_2 iznosi

$$K = F_g\,(h_1 - h_2).$$

Oznaka je udarne radnje loma pri nazivnoj energiji 300 J i kod normalne ispitne epruvete

- s U-zarezom: *KU*
- s V-zarezom: *KV*.

Udarna radnja loma općenito raste s temperaturom. U širokom su temperaturnom području udarno vrlo žilave kovine koje možemo gnječiti: Al, Cu, Ni, austenitni čelik (I); neznatno žilavi su krhke tvari, staklo, keramika, vrlo tvrdi čelici (II). Za obične čelike – nelegirane i malo legirane (III) značajna je velika ovisnost udarne radnje loma o temperaturi: pri višoj su vrlo žilavi, pri nižoj veoma krhki.



ISPITIVANJE TRAJNE ČVRSTOĆE

Ispitivanje statičke izdržljivosti

Konstantnom (statičkom) silom dugotrajno opterećene tvari počet će se pod određenim opterećenjem, u temperaturnoj ovisnosti, postupno rastezati. Ova se pojava, nazvana *puzanje*, zaustavlja ako tvar pri rastezanju očvrsne, dok se u protivnom nastavlja do loma.

Temperatura pri kojoj se pojavljuje puzanje ovisna je o tvari (npr. kod čelika od 400 °C naviše; kod olova ili plastike već pri temperaturi okolice).

Dugotrajnim pokusima (100 000 h) stvarnu trajnu statičku izdržljivost ni nakon tako dugog vremena ne možemo odrediti. Odrediti možemo u svakom primjeru samo vremensku statičku izdržljivost koja vrijedi za određeno ograničeno trajanje opterećenja.

Rezultati kratkotrajnih ispitivanja ne mogu se jednostavno uporabiti pri dugotrajnim opterećenjima. Stoga je preporučljivo trajanje statičkog ispitivanja za:

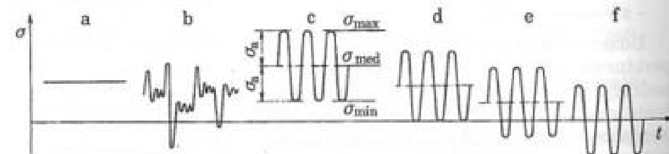
kovine	t = 100 000 h
plastične tvari	t = 10 000 h.

Granica puzanja $R_{p\,\varepsilon/t/\vartheta}$ je naprezanje pri kojem se tvar rastegne do određenog relativnog produljenja ε (npr. 1 %) za određeno vrijeme t (npr. 100 000 h) pri određenoj temperaturi ϑ (npr. 400 °C), što bi se za navedeni primjer napisalo $R_{p\,1/100000/400}$.

Statička izdržljivost $R_{m\,t/\vartheta}$ je naprezanje koje dovodi do loma tvari nakon određenog vremenskog ispitivanja t (npr. 100 000 h) pri određenoj temperaturi ϑ (npr. 600 °C). U navedenom primjeru to označujemo $R_{m\,100000/600}$.

Ispitivanje dinamičke izdržljivosti (HRN C.A4.035 – 1966)

Čvrstoća je tvari znatno manja ako nije tijekom vremena t jednolično opterećena (primjer *a* na slici), već nejednolično (primjer *b*).



Potpuno nejednolična opterećenja nisu prikladna za uspoređivanje ispitnih rezultata. Zato određujemo dinamička svojstva, tvari za sinusoidna opterećenja, u kojih naprezanje koleba za otklon (amplitudu) σ_a (τ_a) od srednjeg naprezanja σ_{med} (τ_{med}) (primjer *c*).

Naprezanja mogu biti:

a) istosmjerna (primjeri *c* i *d*) b) izmjenična (primjeri *e* i *f*).

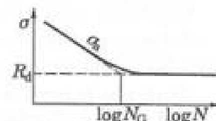
Od raznih sinusoidnih opterećenja posebno su značajna:

1. *pulsirajuće* ili *titrajno dinamičko opterećenje* (primjer *d* u sl. na str. 360), pri kojem naprezanje σ titra (pulsira) za amplitudu σ_a između vrijednosti 0 i σ_{max} oko srednjeg naprezanja σ_{med}; $\sigma_{med} = \sigma_{max}/2$;

2. *gibajuće* ili *kolebajuće dinamičko opterećenje* (primjer *f*), pri kojem naprezanje σ koleba za amplitudu σ_a između vrijednosti $-\sigma_{max}$ i $+\sigma_{max}$; $\sigma_a = \sigma_{max}$, pri čemu je srednje naprezanje $\sigma_{med} = 0$.

Trajnost tvari ovisi o broju titraja opterećenja. Smanjivanjem amplitude naprezanja σ_a pri dinamičkom opterećenju povećava se broj titraja N, koje tvar podnosi bez loma.

Ovisnost $\sigma_a = f(N)$ predočuje »Wöhlerova krivulja«. Wöhlerova se krivulja pri određenom broju titraja N_G (10^7 za čelik, 10^8 za lake kovine) približava stalnoj vrijednosti) R_d, kojom određujemo »dinamičku izdržljivost«.



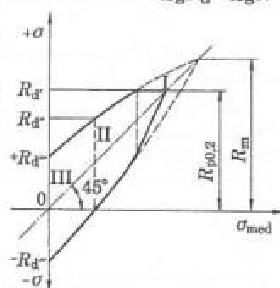
Dinamička izdržljivost R_d je najveće naprezanje pri kojem se tvar ni pri bilo kakvom povećanju broja titraja opterećenja ne bi više slomila.

Dijagram dinamičke izdržljivosti (Smithov dijagram) prikazuje dinamičku izdržljivost R_d u ovisnosti o srednjem naprezanju σ_{med} za razna dinamička opterećenja:

I $R_{d'} = R_{p\,0,2}$ – za mirno opterećenje

II 0 ... R_d'' – za pulsirajuće opterećenje

III $-R_d'''$ ... $+R_d'''$ – za njihajuće opterećenje.



Crta koja u dijagramu ide iz ishodišta pod kutom od 45° prikazuje srednje naprezanje. Udaljenosti od nje prema gore ili dolje do gornjih odnosno donjih graničnih naprezanja su otkloni naprezanja.

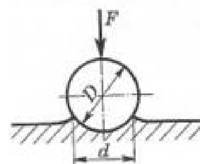
Budući da tvar u konstrukcijama po pravilu ne smijemo opterećivati iznad naprezanja tečenja $R_{p\,0,2}$ tom je granicom u dijagramu dinamičke izdržljivosti ograničeno područje dopuštena naprezanja.

Na dinamičku izdržljivost veoma jako utječe djelovanje zareza (nejednolična razdioba naprezanja), što može dinamičku izdržljivost znatno sniziti ispod vrijednosti koju tvar ima bez zareza. Zato je dinamička izdržljivost zavarenih spojeva (zbog zavarnog »zareza«) ili predmeta s grubo obrađenom površinom (koja se zapravo sastoji od mnogih sitnih »zareza«) mnogo manja.

ISPITIVANJE KOVINSKE TVRDOĆE

Mjera za tvrdoću ovisi o postupku ispitivanja.

Ispitivanje tvrdoće po Brinellu HB (HNR C.A4.003 – 1985 i 032 – 1986), (ISO 6506 – 1981).



U čistu i ravnu površinu pokusne tvari (kovine) utiskuje se određenom silom F (N) kuglica promjera D (mm). Mjeri se promjer otiska d (mm). Mjera je tvrdoće po Brinellu

$$HB = \frac{0{,}102\ F}{A} = 0{,}102\ F \frac{2}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

gdje je A površina otiska (kalote).

Vrijednosti tvrdoća po Brinellu HB za pojedine promjere otiska d predočene su u tablicama na str. 364 i 365. Odlučujuća je srednja vrijednost rezultata barem dvaju mjerenja.

Kuglica je do tvrdoće 450 HB od zakaljenog čelika, do tvrdoće 650 HB od tvrde kovine. (Tvrdoća iznad 650 HB ispituje se po Vickersu – str. 366).

Sila pritiska F mora rasti do nazivne 2 ... 8 s, a djelovanje nazivne sile mora trajati 10 ... 15 s.

Rabe se sljedeće sile pritiska F (N) odn. odgovarajuće vrijednosti 0,102 F (u zagradi) i promjeri kuglica D (mm) – u skupinama po vrijednostima 0,102 F/D^2:

$\frac{0{,}102\ F}{D^2}$	F (N) (0,102 F) za D mm: 10		5		2,5		2		1	
30	29420	(3000)	7355	(750)	1839	(187,5)	1177	(120)	294,2	(30)
15	14710	(1500)	–		–		–		–	
10	9807	(1000)	2452	(250)	612,9	(62,5)	392,2	(40)	98,07	(10)
5	4903	(500)	1226	(125)	306,5	(31,25)	196,1	(20)	49,03	(5)
2,5	2452	(250)	612,9	(62,5)	153,2	(15,625)	98,07	(10)	24,52	(2,5)
1,25	1226	(125)	306,5	(31,25)	76,61	(7,8125)	49,03	(5)	12,26	(1,25)
1	980,7	(100)	245,2	(25)	61,29	(6,25)	39,23	(4)	9,807	(1)

Primjer oznake tvrdoće po Brinellu: 350 HBS 5/750 – znači tvrdoću 350 HB pri uporabi čelične kuglice promjera D = 5 mm i pri vrijednosti 0,102 F = 750 (tj. pri sili pritiska F = 7 355 N).

Vrijednosti 0,102 F/D^2 odabiremo s obzirom na vrstu tvari ispitnog uzorka i njegovu tvrdoću:

Tvar	Tvrdoća HB	0,102 F/D^2
čelik		30
željezni lijevovi	< 140 > 140	10 30
bakar i bakrene slitine	< 35 35 ... 200 > 200	5 10 30
lake kovine i slitine	< 35 35 ... 80 > 80	1,25 2,5 5 10 15 10 15
olovo i kositar		1 1,25

Najmanja debljina uzorka (u mm) u ovisnosti od promjera kuglice D i promjera otiska d:

d mm	D mm: 1	2	2,5	5	d mm	D mm: 5	10
0,2	0,08				2,4	2,46	1,17
0,3	0,18				2,6	2,92	1,38
0,4	0,33				2,8	3,43	1,60
0,5	0,54	0,25			3,0	4,00	1,84
0,6	0,80	0,37	0,29		3,2		2,10
0,7		0,51	0,40		3,4		2,38
0,8		0,67	0,53		3,6		2,68
0,9		0,86	0,67		3,8		3,00
1,0		1,07	0,83		4,0		3,34
1,1		1,32	1,02		4,2		3,70
1,2		1,60	1,23	0,58	4,4		4,08
1,3			1,46	0,69	4,6		4,48
1,4			1,72	0,80	4,8		4,91
1,5			2,00	0,92	5,0		5,36
1,6				1,05	5,2		5,83
1,7				1,19	5,4		6,33
1,8				1,34	5,6		6,86
1,9				1,50	5,8		7,42
2,0				1,67	6,0		8,00
2,2				2,04			

Za čelik možemo iz poznate tvrdoće po Brinellu HB približno odrediti njegovu čvrstoću R_m (N/mm²)

ugljični čelik R_m = 3,6 HB

legirani čelik – Cr R_m = 3,5 HB

– Cr-Ni R_m = 3,4 HB.

Usporedbena tablica (približna) između čvrstoće i tvrdoće čelika nalazi se na str. 372 i 373.

Tvrdoća po Brinellu HB

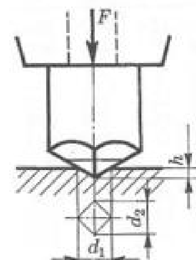
Promjer otiska *d* mm pri promjeru kuglice *D* mm:					Tvrdoća po Brinellu HB za vrijednost 0,102 F/D^2:						
10	5	2,5	2	1	30	15	10	5	2,5	1,25	1
2,40	1,20	0,60	0, 48	0,24	653	327	218	109	54,5	27,2	21,8
2,45			0,49		627	313	209	104	52,2	26,1	20,9
2,50	1,25		0,50	0,25	601	301	200	100	50,1	25,1	20,0
2,55			0,51		578	289	193	96,3	48,1	24,1	19,3
2,60	1,30	0,65	0,52	0,26	555	278	185	92,6	46,3	23,1	18,5
2,65			0,53		534	267	178	89,0	44,5	22,3	17,8
2,70	1,35		0,54	0,27	514	257	171	85,7	42,9	21,4	17,1
2,75			0,55		495	248	165	82,6	41,3	20,6	16,5
2,80	1,40	0,70	0,56	0,28	477	239	159	79,6	39,8	19,9	15,9
2,85			0,57		461	230	154	76,8	38,4	19,2	15,4
2,90	1,45		0,58	0,29	444	222	148	74,1	37,0	18,5	14,8
2,95			0,59		429	215	143	71,5	35,8	17,9	14,3
3,00	1,50	0,75	0,60	0,30	415	207	138	69,1	34,6	17,3	13,8
3,05			0,61		401	200	134	66,8	33,4	16,7	13,4
3,10	1,55		0,62	0,31	388	194	129	64,6	32,3	16,2	12,9
3,15			0,63		375	188	125	62,5	31,3	15,6	12,5
3,20	1,60	0,80	0,64	0,32	363	182	121	60,5	30,3	15,1	12,1
3,25			0,65		352	176	117	58,6	29,3	14,7	11,7
3,30	1,65		0,66	0,33	341	170	114	56,8	28,4	14,2	11,4
3,35			0,67		331	165	110	55,1	27,5	13,8	11,0
3,40	1,70	0,85	0,68	0,34	321	160	107	53,4	26,7	13,4	10,7
3,45			0,69		311	156	104	51,8	25,9	13,0	10,4
3,50	1,75		0,70	0,35	302	151	101	50,3	25,2	12,6	10,1
3,55			0,71		293	147	97,7	48,9	24,4	12,2	9,77
3,60	1,80	0,90	0,72	0,36	285	142	95,0	47,5	23,7	11,9	9,50
3,65			0,73		277	138	92,3	46,1	23,1	11,5	9,23
3,70	1,85		0,74	0,37	269	135	89,7	44,9	22,4	11,2	8,97
3,75			0,75		262	131	87,2	43,6	21,8	10,9	8,72
3,80	1,90	0,95	0,76	0,38	255	127	84,9	42,4	21,2	10,6	8,49
3,85			0,77		248	124	82,6	41,3	20,6	10,3	8,26
3,90	1,95		0,78	0,39	241	121	80,4	40,2	20,1	10,0	8,04
3,95			0,79		235	117	78,3	39,1	19,6	9,79	7,83
4,00	2,00	1,00	0,80	0,40	229	114	76,3	38,1	19,1	9,53	7,63
4,05			0,81		223	111	74,3	37,1	18,6	9,29	7,43
4,10	2,05		0,82	0,41	217	109	72,4	36,2	18,1	9,05	7,24
4,15			0,83		212	106	70,6	35,3	17,6	8,82	7,06
4,20	2,10	1,05	0,84	0,42	207	103	68,8	34,4	17,2	8,61	6,88
4,25			0,85		201	101	67,1	33,6	16,8	8,39	6,71

Tvrdoća po Brinellu HB (*konac*)

Promjer otiska *d* mm pri promjeru kuglice *D* mm:					Tvrdoća po Brinellu HB za vrijednost 0,102 F/D^2:						
10	5	2,5	2	1	30	15	10	5	2,5	1,25	1
4,30	2,15		0,86	0,43	197	98,3	65,5	32,8	16,4	8,19	6,55
4,35			0,87		192	95,9	63,9	32,0	16,0	7,99	6,39
4,40	2,20	1,10	0,88	0,44	187	93,6	62,4	31,2	15,6	7,80	6,24
4,45			0,89		183	91,4	60,9	30,5	15,2	7,62	6,09
4,50	2,25		0,90	0,45	179	89,3	59,5	29,8	14,9	7,44	5,95
4,55			0,91		174	87,2	58,1	29,1	14,5	7,27	5,81
4,60	2,30	1,15	0,92	0,46	170	85,2	56,8	28,4	14,2	7,10	5,68
4,65			0,93		167	83,3	55,5	27,8	13,9	6,94	5,55
4,70	2,35		0,94	0,47	163	81,4	54,3	27,1	13,6	6,78	5,43
4,75			0,95		159	79,6	53,0	26,5	13,3	6,63	5,30
4,80	2,40	1,20	0,96	0,48	156	77,8	51,9	25,9	13,0	6,48	5,19
4,85			0,97		152	76,1	50,7	25,4	12,7	6,34	5,07
4,90	2,45		0,98	0,49	149	74,4	49,6	24,8	12,4	6,20	4,96
4,95			0,99		146	72,8	48,6	24,3	12,1	6,07	4,86
5,00	2,50	1,25	1,00	0,50	143	71,3	47,5	23,8	11,9	5,94	4,75
5,05			0,01		140	69,8	46,5	23,3	11,6	5,81	4,65
5,10	2,55		1,02	0,51	137	68,3	45,5	22,8	11,4	5,69	4,55
5,15			1,03		134	66,9	44,6	22,3	11,1	5,57	4,46
5,20	2,60	1,30	1,04	0,52	131	65,5	43,7	21,8	10,9	5,46	4,37
5,25			1,05		128	64,1	42,8	21,4	10,7	5,34	4,28
5,30	2,65		1,06	0,53	126	62,8	41,9	20,9	10,5	5,24	4,19
5,35			1,07		123	61,5	41,0	20,5	10,3	5,13	4,10
5,40	2,70	1,35	1,08	0,54	121	60,3	40,2	20,1	10,1	5,03	4,02
5,45			1,09		118	59,1	39,4	19,7	9,85	4,93	3,94
5,50	2,75		1,10	0,55	116	57,9	38,6	19,3	9,66	4,83	3,86
5,55			1,11		114	56,8	37,9	18,9	9,47	4,73	3,79
5,60	2,80	1,40	1,12	0,56	111	55,7	37,1	18,6	9,28	4,64	3,71
5,65			1,13		109	54,6	36,4	18,2	9,10	4,55	3,64
5,70	2,85		1,14	0,57	107	53,5	35,7	17,8	8,92	4,46	3,57
5,75			1,15		105	52,5	35,0	17,5	8,75	4,38	3,50
5,80	2,90	1,45	1,16	0,58	103	51,5	34,3	17,2	8,59	4,29	3,43
5,85			1,17		101	50,5	33,7	16,8	8,42	4,21	3,37
5,90	2,95		1,18	0,59	99,2	49,6	33,1	16,5	8,26	4,13	3,31
5,95			1,19		97,3	48,7	32,4	16,2	8,11	4,05	3,24
6,00	3,00	1,50	1,20	0,60	95,5	47,7	31,8	15,9	7,96	3,98	3,18

Ispitivanje tvrdoće po Vickersu HV (HRN C.A4.033 –1984) (ISO 6507/1,2,3 – 1982, 1983, 1988).

U površinu ispitivane tvari utisnemo dijamantni šiljak u obliku piramide (s kutom 136°) proizvoljnom silom F.



Tvrdoća po Vickersu HV računa se iz sile pritiska F (N) i površine utisnutog plašta piramide A (mm^2), koju određujemo mjerenjem dijagonala d_1 i d_2 (mm)

$$\mathrm{HV} = 0{,}102\,\frac{F}{A} \qquad A = \frac{d^2}{2\sin(136/2)} \qquad d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$\mathrm{HV} \approx 0{,}1891\,\frac{F}{d^2}$$

Dijagonale d_1 i d_2 mjerimo s točnošću ±0,001 mm. Debljina ispitnog uzorka mora biti najmanje 1,5 d.

U pravilu rabimo sljedeće sile pritiska F, raspoređene po zaokruženim vrijednostima 0,102 F dodajući ih (za preočenje uporabljene sile pritiska) oznaci tvrdoće po Vickersu HV:

F/N 0,102 F HV	49,03 5 HV 5	98,07 10 HV 10	196,1 20 HV 20	294,2 30 HV 30	490,3 50 HV 50	980,7 100 HV 100

Pri mjerenju tvrdoće veoma tankih slojeva rabimo sile pritiska od 2 ... 30 N:

F/N HV	1,961 HV 0,2	2,942 HV 0,3	4,903 HV 0,5	9,807 HV 1	19,61 HV 2	24,52 HV 2,5	29,42 HV 3

a pri mjerenju mikrotvrdoće (tvrdoće faznih konstituanata tvari) i sile manje od 2 N:

F/N HV	0,098 07 HV 0,01	0,196 1 HV 0,02	0,245 2 HV 0,025	0,490 3 HV 0,05	0,980 7 HV 0,1

Za jednake otiske nekom drugom silom F' Vickersova je tvrdoća:

$$\mathrm{HV}' = \mathrm{HV} \cdot \frac{F'}{F}\,.$$

Vrijednosti tvrdoće po Vickersu HV (HV 5, HV 10, HV 100) predočene su u tablicama na str. 367 ... 369.

Tvrdoća po Vickersu HV je do vrijednosti 250 HV brojčano jednaka tvrdoći po Brinellu HB, a iznad ove vrijednosti raste tvrdoća po Vickersu brže nego po Brinellu.

Tvrdoća po Vickersu HV 5 pri sili pritiska F = 49,03 N (0,102 F = 5), za dijagonale otisaka d = 0,056 ... 0,099 mm

d/mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,05.							2957	2854	2756	2664
0,06.	2576	2492	2412	2336	2264	2195	2129	2066	2005	2948
0,07.	1892	1839	1789	1740	1693	1648	1605	1564	1524	1486
0,08.	1449	1413	1379	1346	1314	1283	1254	1225	1197	1171
0,09.	1145	1120	1096	1072	1049	1027	1006	985	965	946

Tvrdoća po Vickersu HV 10 pri sili pritiska F = 98,07 N (0,102 F = 10), za dijagonale otisaka d = 0,100 ... 0,999 mm

d/mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,10.	1855	1818	1782	1748	1715	1682	1651	1620	1590	1561
0,11.	1533	1505	1478	1452	1427	1402	1378	1355	1332	1310
0,12.	1288	1267	1246	1226	1206	1187	1168	1150	1132	1114
0,13.	1097	1081	1064	1048	1033	1018	1003	988	974	960
0,14.	946	933	920	907	894	882	870	858	847	835
0,15.	824	813	803	792	782	772	762	752	743	734
0,16.	724	715	707	698	690	681	673	665	657	649
0,17.	642	634	627	620	613	606	599	592	585	579
0,18.	572	566	560	554	548	542	536	530	525	519
0,19.	514	508	503	498	493	488	483	478	473	468
0,20.	464	459	454	450	446	441	437	433	429	425
0,21.	421	417	413	409	405	401	397	394	390	387
0,22.	383	380	376	373	370	366	363	360	357	354
0,23.	351	348	345	342	339	336	333	330	327	325
0,24.	322	319	317	314	311	309	306	304	302	299
0,25	297	294	292	290	287	285	283	281	279	276
0,26.	274	272	270	268	266	264	262	260	258	256
0,27.	254	253	251	249	247	245	243	242	240	238
0,28.	237	235	233	232	230	228	227	225	224	222
0,29	221	219	218	216	215	213	212	210	209	207
0,30.	206	205	203	202	201	199	198	197	195	194
0,31.	193	192	191	189	188	187	186	185	183	182
0,32.	181	180	179	178	177	176	174	173	172	171
0,33.	170	169	168	167	166	165	164	163	162	161
0,34.	160	159	159	158	157	156	155	154	153	152
0,35.	151	151	150	149	148	147	146	146	145	144
0,36.	143	142	142	141	140	139	138	138	137	136
0,37.	135	135	134	133	133	132	131	130	130	129
0,38.	128	128	127	126	126	125	124	124	123	123
0,39.	122	121	121	120	119	119	118	118	117	116
0,40.	116	115	115	114	114	113	113	112	111	111
0,41.	110	110	109	109	108	108	107	107	106	106
0,42.	105	105	104	104	103	103	102	102	101	101
0,43.	100	99,8	99,4	98,9	98,5	98,0	97,6	97,1	76,7	96,2
0,44.	95,8	95,4	94,9	94,5	94,1	93,6	93,2	92,8	92,4	92,0
0,45.	91,6	91,2	90,8	90,4	90,0	89,6	89,2	88,8	88,4	88,0
0,46.	87,6	87,3	86,9	86,5	86,1	85,8	85,4	85,0	84,7	84,3
0,47.	84,0	83,6	83,2	82,9	82,5	82,2	81,8	81,5	81,2	80,8
0,48.	80,5	80,2	79,8	79,5	79,2	78,8	78,5	78,2	77,9	77,6
0,49.	77,2	76,9	76,6	76,3	76,0	75,7	75,4	75,1	74,8	74,5
0,50.	74,2	73,9	73,6	73,3	73,0	72,7	72,4	72,1	71,9	71,6
0,51.	71,3	71,0	70,7	70,5	70,2	69,9	69,7	69,4	69,1	68,8
0,52.	68,6	68,3	68,1	67,8	67,5	67,3	67,0	66,8	66,5	66,3
0,53.	66,0	65,8	65,5	65,3	65,0	64,8	64,6	64,3	64,1	63,8
0,54.	63,6	63,4	63,1	62,9	62,7	62,4	62,2	62,0	61,8	61,5
0,55.	61,3	61,1	60,9	60,6	60,4	60,2	60,0	59,8	59,6	59,3
0,56.	59,1	58,9	58,7	58,5	58,3	58,1	57,9	57,7	57,5	57,3

Tvrdoća po Vickersu *(konac)*

d/mm	..,..0	..,..1	..,..2	..,..3	..,..4	..,..5	..,..6	..,..7	..,..8	..,..9
0,57.	57,1	56,9	56,7	56,5	56,3	56,1	55,9	55,7	55,5	55,3
0,58.	55,1	54,9	54,7	54,6	54,4	54,2	54,0	53,8	53,6	53,5
0,59.	53,3	53,1	52,9	52,7	52,6	52,4	52,2	52,0	51,9	51,7
0,60.	51,5	51,3	51,2	51,0	50,8	50,7	50,5	50,3	50,2	50,0
0,61.	49,8	49,7	49,5	49,4	49,2	49,0	48,9	48,7	48,6	48,4
0,62.	48,2	48,1	47,9	47,8	47,6	47,5	47,3	47,2	47,0	46,9
0,63.	46,7	46,6	46,4	46,3	46,1	46,0	45,8	45,7	45,6	45,4
0,64.	45,3	45,1	45,0	44,9	44,7	44,6	44,4	44,3	44,2	44,0
0,65.	43,9	43,8	43,6	43,5	43,4	43,2	43,1	43,0	42,8	42,7
0,66.	42,6	42,4	42,3	42,2	42,1	41,9	41,8	41,7	41,6	41,4
0,67.	41,3	41,2	41,1	40,9	40,8	40,7	40,6	40,5	40,3	40,2
0,68.	40,1	40,0	39,9	39,8	39,6	39,5	39,4	39,3	39,2	39,1
0,69.	39,0	38,8	38,7	38,6	38,5	38,4	38,3	38,2	38,1	38,0
0,70.	37,8	37,7	37,6	37,5	37,4	37,3	37,2	37,1	37,0	36,9
0,71.	36,8	36,7	36,6	36,5	36,4	36,3	36,2	36,1	36,0	35,9
0,72.	35,8	35,7	35,6	35,5	35,4	35,3	35,2	35,1	35,0	34,9
0,73.	34,8	34,7	34,6	34,5	34,4	34,3	34,2	34,1	34,0	34,0
0,74.	33,9	33,8	33,7	33,6	33,5	33,4	33,3	33,2	33,1	33,1
0,75.	33,0	32,9	32,8	32,7	32,6	32,5	32,4	32,4	32,3	32,2
0,76.	32,1	32,0	31,9	31,9	31,8	31,7	31,6	31,5	31,4	31,4
0,77.	31,3	31,2	31,1	31,0	31,0	30,9	30,8	30,7	30,6	30,6
0,78.	30,5	30,4	30,3	30,2	30,2	30,1	30,0	29,9	29,9	29,8
0,79.	29,7	29,6	29,6	29,5	29,4	29,3	29,3	29,2	29,1	29,0
0,80.	29,0	28,9	28,8	28,8	28,7	28,6	28,5	28,5	28,4	28,3
0,81.	28,3	28,2	28,1	28,1	28,0	27,9	27,9	27,8	27,7	27,6
0,82.	27,6	27,5	27,4	27,4	27,3	27,2	27,2	27,1	27,0	27,0
0,83.	26,9	26,9	26,8	26,7	26,7	26,6	26,5	26,5	26,4	26,3
0,84.	26,3	26,2	26,2	26,1	26,0	26,0	25,9	25,9	25,8	25,7
0,85.	25,7	25,6	25,5	25,5	25,4	25,4	25,3	25,3	25,2	25,1
0,86.	25,1	25,0	25,0	24,9	24,8	24,8	24,7	24,7	24,6	24,6
0,87.	24,5	24,4	24,4	24,3	24,3	24,2	24,2	24,1	24,1	24,0
0,88.	23,9	23,9	23,8	23,8	23,7	23,7	23,6	23,6	23,5	23,5
0,89.	23,4	23,4	23,3	23,3	23,2	23,2	23,1	23,0	23,0	22,9
0,90.	22,9	22,8	22,8	22,7	22,7	22,6	22,6	22,5	22,5	22,4
0,91.	22,4	22,3	22,3	22,2	22,2	22,2	22,1	22,1	22,0	22,0
0,92.	21,9	21,9	21,8	21,8	21,7	21,7	21,6	21,6	21,5	21,5
0,93.	21,4	21,4	21,3	21,3	21,3	21,2	21,2	21,1	21,1	21,0
0,94.	21,0	20,9	20,9	20,9	20,8	20,8	20,7	20,7	20,6	20,6
0,95.	20,5	20,5	20,5	20,4	20,4	20,3	20,3	20,2	20,2	20,2
0,96.	20,1	20,1	20,0	20,0	20,0	19,9	19,9	19,8	19,8	19,8
0,97.	19,7	19,7	19,6	29,6	19,5	19,5	19,5	19,4	19,4	19,3
0,98.	19,3	19,3	19,2	19,2	19,2	19,1	19,1	19,0	19,0	19,0
0,99.	18,9	18,9	18,8	18,8	18,8	18,7	18,7	18,7	18,6	18,6

Tvrdoća po Vickersu HV 100 pri sili pritiska F = 980,7 N (0,102 F = 100) za dijagonale otisaka d = 1,00 ... 1,99 mm

1,0.	185	182	178	175	171	168	165	162	159	156
1,1.	153	151	148	145	143	140	138	135	133	131
1,2.	129	127	125	123	121	119	117	115	113	111
1,3.	110	108	106	105	103	102	100	98,8	97,4	96,0
1,4.	94,6	93,3	92,0	90,7	89,4	88,2	87,0	85,8	84,7	83,5
1,5.	82,4	81,3	80,3	79,2	78,2	77,2	76,2	75,2	74,3	73,4
1,6.	72,4	71,5	70,7	69,8	69,0	68,1	67,3	66,5	65,7	64,9
1,7.	64,2	63,4	62,7	62,0	61,3	60,6	59,9	59,2	58,5	57,9
1,8.	57,2	56,6	56,0	55,4	54,8	54,2	53,6	53,0	52,5	51,9
1,9.	51,4	50,8	50,3	49,8	49,3	48,8	48,3	47,8	47,3	46,8

Korekturni faktori: d srednja dijagonala otiska, D promjer uzorka

d/D	Kuglasta površina		Valjkasta površina [1] ×		Valjkasta površina [1] +	
	konveksna	konkavna	konveksna	konkavna	konveksna	konkavna
0,005	0,994	1,006	–	–	–	–
0,01	0,989	1,013	0,994	1,006	0,995	1,006
0,015	0,983	1,019	0,991	1,009	0,992	1,009
0,02	0,978	1,025	0,988	1,012	0,990	1,013
0,025	0,973	1,031	0,986	1,015	0,987	1,016
0,03	0,968	1,038	0,983	1,018	0,985	1,020
0,035	0,963	1,045	0,980	1,021	0,982	1,024
0,04	0,958	1,053	0,977	1,024	0,980	1,028
0,045	0,953	1,060	0,974	1,027	0,978	1,032
0,05	0,949	1,068	0,972	1,030	0,977	1,037
0,06	0,941	1,085	0,966	1,036	0,973	1,047
0,07	0,932	1,103	0,961	1,043	0,969	1,059
0,08	0,924	1,122	0,956	1,049	0,966	1,071
0,09	0,917	1,143	0,950	1,056	0,964	1,085
0,10	0,910	–	0,945	1,062	0,961	1,100
0,11	0,903	–	0,940	1,069	0,959	1,118
0,12	0,896	–	0,935	1,076	0,956	1,140
0,13	0,890	–	0,930	1,082	0,954	–
0,14	0,884	–	0,925	1,089	0,952	–
0,15	0,878	–	0,920	1,096	0,951	–
0,16	0,873	–	0,915	1,104	0,949	–
0,17	0,868	–	0,910	1,111	0,948	–
0,18	0,863	–	0,905	1,118	0,946	–
0,19	0,858	–	0,900	1,126	0,945	–
0,20	0,853	–	0,895	1,133	0,944	–
0,21	–	–	–	1,141	0,943	–
0,22	–	–	–	1,148	0,942	–

Ispitivanje tvrdoće kovina po Rockwellu

(HRN C.A4.031 – 1980) (ISO 6508 – 1986, ISO/DIS 1024 – 1988)

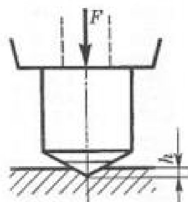
Rockwellovim postupkom utiskuje se određenom silom u površinu ispitivane tvari posebni utiskivač, pri čemu se ne mjeri površina otiska, već njegova dubina. Utiskivač je dijamantni stožac vršnoga kuta 120° (i polumjera zaokruženja 0,2 mm) ili čelična kuglica promjera 1,587 5 mm, ili 3,175 mm.

Utiskivač se prisloni na površinu ispitivane tvari početnom silom F_0, pri čemu se dobiva otisak dubine h_0. To je ishodišni položaj za koji valja

[1] × dijagonale otiska pod 45° s osi uzorka.
\+ jedna dijagonala otiska paralelna s osi uzorka.

mjerilo za dubinu namjestiti na ishodišnu vrijednost »0«. Zatim se poveća pritisak utiskivača (u vremenu od 4 do 8 s) dodanom silom F_1 na ukupnu silu F. Vrijeme opterećenja ukupnom silom F ovisno je o sklonosti ispitivane tvari puzanju i traje od 2 s (za tvar bez pojave puzanja) do više od 30 s (za tvar s pojavama puzanja). Potom se ukloni dodatna sila F_1 te se pri opterećenju početnom silom F_0 očita na mjerilu dubinu otiska h (mm).

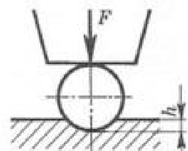
Debljina ispitnog uzorka mora biti najmanje 8 puta veća od h.



a) *Određivanje tvrdoće stošcem*

Najčešće se primjenjuje postupak HRC (za kaljeni čelik i slitine), u iznimnim slučajevima još i postupci HRA i HRD (za tvrde kovine) i HR15N, HR30N i HR45N (za tanke uzorke ili male ispitne površine). Pritisna sila i odgovarajuća tvrdoća su:

Postupak:	HRC	HRA	HRD	HR15N	HR30N	HR45N
Sile F_0/N	98,07	98,07	98,07	29,42	29,42	29,42
F_1/N	1 373	490,3	882,6	117,7	264,8	411,9
F/N	1 471	588,4	980,7	147,2	294,2	441,3
HR ... =	100 ... 500 h			100 ... 1 000 h		



b) *Određivanje tvrdoće kuglicom*

Od postupaka s kuglicom promjera 1,5875 mm najviše se primjenjuje postupak HRB (za nekaljeni čelik, mjed, broncu), za posebne svrhe još i postupci HRF (za hladno valjani tanki lim, bakar), HRG (za slitine bakra s fosforom) te HR15T, HR30T i HR45T (za vrlo tanke uzorke ili male ispitne površine). Postupci s kuglicom promjera 3,175 mm su HRE, HRH i HRK.

Postupak:	HRE	HRH	HRK	HR15T	HR30T	HR45T
Sile F_0/N	98,07	98,07	98,7	29,42	29,42	29,42
F_1/N	882,6	490,3	1 373	117,7	264,8	411,9
F/N	980,7	588,4	1 471	147,1	294,2	441,3
HR ... =	130 ... 500 h			100 ... 1 000 h		

Područja uporabljivosti postupaka za ispitivanje tvrdoće po Rockwellu

Dijamantni stožac	Kuglica 1,587 5 mm	Kuglica 3,175 mm
20 ... 70 HRC	20 ... 100 HRB	70 ... 100 HRE
20 ... 88 HRA	60 ... 100 HRF	80 ... 100 HRH
40 ... 77 HRD	30 ... 94 HRG	40 ... 100 HRK
70 ... 94 HR15N	67 ... 93 HR15T	
42 ... 86 HR30N	29 ... 82 HR30T	
20 ... 77 HR45N	1 ... 72 HR45T	

Korekcijski dodatci za vrijednosti tvrdoće po Rockwellu, mjerene na izbočenim (konveksnim) valjastim površinama s promjerom *d* mm

Tvrdoća HR ...	*d* mm				Tvrdoća HR ...	*d* mm			
	3	6,5	9,5	12,5		3,2	6,5	9,5	12,5
HRC HRA HRD					HR15N HR30N HR45N				
20			2,0	1,5	20	3,0	1,5	1,5	1,5
25		3,0	2,0	1,0	25	3,0	1,5	1,5	1,0
30		2,5	1,5	1,0	30	3,0	1,5	1,0	1,0
35		2,0	1,5	1,0	35	2,5	1,5	1,0	1,0
40		2,0	1,0	1,0	40	2,5	1,5	1,0	1,0
45	3,0	1,5	1,0	0,5	45	2,0	1,0	1,0	1,0
50	2,5	1,5	1,0	0,5	50	2,0	1,0	1,0	1,0
55	2,0	1,0	0,5	0,5	55	2,0	1,0	0,5	0,5
60	1,5	1,0	0,5	0,5	60	1,5	1,0	0,5	0,5
65	1,5	1,0	0,5	0,5	65	1,5	0,5	0,5	0,5
70	1,0	0,5	0,5	0,5	70	1,0	0,5	0,5	0,5
75	1,0	0,5	0,5	0	75	1,0	0,5	0,5	0
80	0,5	0,5	0,5	0	80	0,5	0,5	0	0
85	0,5	0,5	0	0	85	0,5	0,5	0	0
90	0,5	0	0	0	90	0	0	0	0
HRB HRF HRG					HR15T HR30T HR45T				
20			4,0	3,0	20	(9,0)	(4,5)	3,0	2,0
30		5,0	3,5	2,5	30	(7,5)	(4,0)	2,5	2,0
40		4,5	3,0	2,5	40	(6,5)	(3,5)	2,5	2,0
50		4,0	3,0	2,0	50	(5,5)	3,0	2,0	1,5
60		3,5	2,5	2,0	60	(4,5)	2,5	1,5	1,5
70		3,0	2,0	1,5	70	(3,5)	2,0	1,0	1,0
80	5,0	2,5	1,5	1,5	80	2,0	1,5	1,0	0,5
90	4,0	2,0	1,5	1,0	90	1,0	0,5	0,5	0,5
100	3,5	1,5	1,0	0,5					

Korekcijski dodatak za vrijednosti tvrdoće HRC, mjerene na kružnim površinama s promjerom d mm:

$$\Delta H = 59\ (1 - \mathrm{HRC}/160)^2/d\ .$$

Približan odnos različitih mjera tvrdoće i čvrstoće čelika

Tvrdoća				Čvrstoća čelika R_m/(N/mm^2)		
Brinell	Vickers	Rockwell				
HB	HV	HRB	HRC	C	Cr	Cr-Ni
	1 175		70	2 720	2 640	2 560
	1 085		68	2 680	2 610	2 530
	1 000		66	2 560	2 490	2 420
	930		64	2 460	2 390	2 320
	845		62	2 350	2 290	2 220
	790		60	2 260	2 200	2 130
	735		58	2 160	2 100	2 040
	692		57	2 080	2 020	1 970
	645		55	2 000	1 940	1 880
	608		53	1 920	1 870	1 820
	575		52	1 850	1 800	1 750
	546		50	1 780	1 730	1 680
	520		49	1 720	1 670	1 620
	496		47	1 660	1 610	1 570
	473		46	1 600	1 550	1 510
	454		45	1 550	1 510	1 460
	437	115	44	1 490	1 450	1 410
400	420	114	42	1 440	1 400	1 360
388	404	114	41	1 400	1 360	1 320
375	389	113	40	1 350	1 310	1 280
363	375	113	38	1 310	1 270	1 240
352	363	112	37	1 270	1 220	1 200
341	350	111	36	1 220	1 190	1 160
330	339	111	35	1 190	1 160	1 130
321	327	110	34	1 160	1 120	1 090
311	316	109	33	1 120	1 090	1 060
302	305	108	32	1 090	1 060	1 030
293	296	107	31	1 040	1 020	990
285	287	107	30	1 030	1 000	970
277	279	106	29	1 000	970	940
269	270	105	28	970	940	920
262	263	104	26	940	920	890
255	256	103	25	920	890	870
248	248	102	24	890	870	840
241	241	101	23	870	840	820
235	235	100	22	850	820	800
229	229	99	21	820	800	780
223	223	98	20	800	780	760
217	217	97	19	780	760	740
212	212	96	18	760	740	720

Približan odnos različitih mjera tvrdoće i čvrstoće čelika *(konac)*

Tvrdoća				Čvrstoća čelika R_m/(N/mm^2)		
Brinell	Vickers	Rockwell				
HB	HV	HRB	HRC	C	Cr	Cr-Ni
207	207	95	17	750	730	700
201	201	94	16	720	700	680
197	197	93	15	710	690	670
192	192	92	14	690	670	650
187	187	91		670	660	640
183	183	90		660	640	620
179	179	89		640	630	610
174	174	88		630	610	590
170	170	87		610	600	580
167	167	86		600	580	560
163	163	85		590	570	550
159	159	84		570	560	540
156	156	83		560	550	530
152	152	82		550	530	520
149	149	81		540	520	510
146	146	80		530	510	500
143	143	79		520	500	490
140	140	78		500	490	480
137	137	77		490	480	470
133	133	76		480	470	460
131	131	75		470	460	450
128	128	74		460	450	440
126	126	73		450	440	430
123	123	72		440	430	420
121	121	71		440	420	410
118	118	69		430	410	400
116	116	68		420	410	390
114	114	67		410	400	390
111	111	65		400	390	380
109	109	64		390	380	370
107	107	62		390	380	360
105	105	61		380	370	360
103	103	59		370		
101	101	58		360		
99	99	56		360		
97	97	54		350		
95	95	52		340		
92				330		
89				320		
86				310		

Ispitivanje tvrdoće polimernih tvari

Za ispitivanje tvrdoće plastomera i gume rabe se postupci:

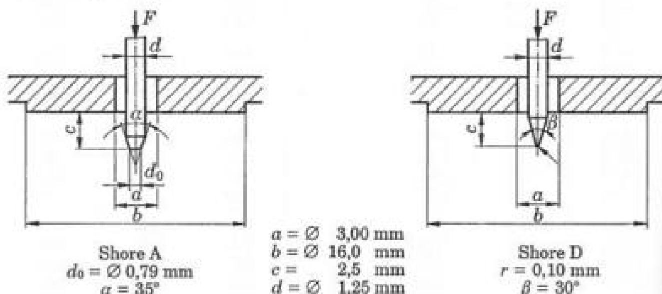
za mekše ispitne uzorke – postupak Shore A

za tvrđe ispitne uzorke – postupak Shore D.

Za točnija ispitivanja primjenjuje se postupak IRHD.

a) Postupci Shore A i Shore D (HRN G.S2.125 – 1986 i G.S2.525 – 1984) (ISO 868-1985).

Ispitni uzorak (debljine > 6 mm, promjera > 30 mm) pritisnemo na podlogu pritisnom pločom s rupom, kroz koju utiskujemo utisnu iglu određenog oblika:



Utisnu iglu utiskujemo u uzorke oprugom, čija se opružna sila F (N) mijenja ovisno o tvrdoći po Shoreu za:

postupak Shore A: $F = 0{,}550 + 0{,}075\ H_A$, Shore D: $F = 0{,}445\ H_D$

Tvrdoća H po postupcima Shore A i D određena je dubinom otiska h:

$$H = 100 - 40\,h$$

tako da je:

$$H = 0 \quad \text{za} \quad h = 2{,}5 \text{ mm}$$

$$H = 100 \quad \text{za} \quad h = 0 \text{ mm}$$

i vrijedi:

za postupak Shore A:

$$F = 8{,}05 - 3\,h$$

za postupak Shore D:

$$F = 44{,}5 - 17{,}8\,h$$

Tvrdoća Shore H	Dubina otiska $\frac{h}{mm}$	Opružna sila $\frac{F}{N}$ Shore A	Shore D
0	2,5	0,55	0
10	2,25	1,30	4,45
20	2,0	2,05	8,90
30	1,75	2,805	13,35
40	1,5	3,555	17,80
50	1,25	4,305	22,25
60	1,0	5,06	26,70
70	0,75	5,81	31,15
80	0,5	6,56	35,60
90	0,25	7,31	40,05
100	0	8,065	44,50

b) Postupak po međunarodnoj ljestvici za tvrdoću gume IRHD *(International Rubber Hardness Degree)* (HRN G.S2.143 – 1986) (ISO 7619 – 1986). Tim se postupkom ponajprije ispituje tvrdoća (mekane) gume i to utisnom dubinom h (mm) čelične kuglice, određena promjera D, pri određenoj sili pritiska.

Ispitne uzorke pritišćemo na podlogu pritisnom pločom silom od 8,3 N.

Početna sila pritiska na kuglicu iznosi 0,3 N, dodatna 5,4 N, a ukupna 5,7 N. Mjeri se dubina otiska h koji određuje tvrdoću IRHD po sljedećoj tablici, a za ispitivanje kuglicom promjera D:

– za manju tvrdoću $D = 5$ mm

– za osrednju tvrdoću $D = 2{,}5$ mm

– za veliku tvrdoću $D = 1$ mm.

D = 5 mm				D = 2,5 mm				D = 1 mm	
$\frac{h}{mm}$	IRHD	$\frac{h}{mm}$	IRHD	$\frac{h}{mm}$	IRHD	$\frac{h}{mm}$	IRHD	$\frac{h}{mm}$	IRHD
1,10	34,9	2,10	17,8	0,00	100	1,00	48,8	0,02	100
1,15	33,6	2,15	17,3	0,05	99,3	1,05	47,1	0,06	99,6
1,20	32,4	2,20	16,8	0,10	97,1	1,10	45,6	0,10	98,8
1,25	31,2	2,25	16,3	0,15	94,0	1,15	44,1	0,12	98,3
1,30	30,0	2,30	15,8	0,20	90,6	1,20	42,7	0,14	97,6
1,35	29,0	2,35	15,3	0,25	87,1	1,25	41,4	0,16	97,0
1,40	28,0	2,40	14,9	0,30	83,6	1,30	40,1	0,18	96,2
1,45	27,0	2,45	14,5	0,35	80,2	1,35	38,9	0,20	95,4
1,50	26,1	2,50	14,1	0,40	77,0	1,40	37,8	0,22	94,6
1,55	25,2	2,55	13,7	0,45	73,9	1,45	36,7	0,24	93,8
1,60	24,4	2,60	13,4	0,50	71,0	1,50	35,6	0,26	92,9
1,65	23,6	2,65	13,0	0,55	68,2	1,55	34,6	0,28	92,0
1,70	22,8	2,70	12,7	0,60	65,5	1,60	33,6	0,30	91,1
1,75	22,0	2,75	12,4	0,65	63,0	1,65	32,6	0,32	90,2
1,80	21,3	2,80	12,1	0,70	60,6	1,70	31,7	0,34	89,3
1,85	20,7	2,85	11,8	0,75	58,3	1,75	30,9	0,36	88,4
1,90	20,1	2,90	11,5	0,80	56,2	1,80	30,0	0,38	87,5
1,95	19,5	2,95	11,2	0,85	54,2			0,40	86,6
2,00	18,9	3,00	11,0	0,90	52,3			0,42	85,7
2,05	18,4	3,05	10,7	0,95	50,5			0,44	84,8

Primjer oznake tvrdoće po postupku IRHD: H = 70 IRHD

Određivanje temperature omekšavanja plastomera – Vicatov postupak (HRN G.S2.641 – 1970) (ISO 306 – 1987)

Rabimo ispitni uzorak oblika kvadratne pločice, bridova 10 mm i debljine 3 ... 6,4 mm.

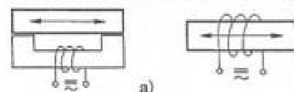
Određujemo temperaturu pri kojoj se utisna igla, promjera okruglog presjeka 1,000 ± 0,015 mm utisne 1 mm duboko u uzorak pri opterećenju 10 ± 0,2 N po postupku A ili 50 ± 1 N po postupku B.

Ispitni uzorak zagrijavamo u tekućini (npr. u parafinu, glicerinu, transformatorskom ili silikonskom ulju i sl.).

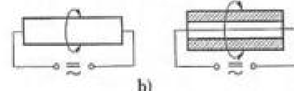
Magnetno ispitivanje

Predmete koji se mogu magnetizirati (sivi lijev, čelik) premažemo slojem rijetkog ulja (petroleja) kojemu smo dodali željeznog praha te ih magnetiziramo. U homogenoj tvari nastaje jednolično magnetno polje, pri čemu se i željezni prah raspodijeli jednoliko. Svaka nehomogenost u tvari (šupljine, strana tijela) ili sitne, oku nevidljive, pukotine uzrokuju otklon magnetnog polja koji se očituje u nejednoličnoj raspodjeli željeznog praha na površini i time se otkrivaju nepravilnosti. One će se pokazati iako su pod površinom.

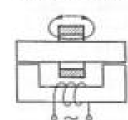
Otklon magnetnog polja osobito je jak ako su nepravilnosti okomite na smjer magnetnog polja, dok nepravilnosti u smjeru polja na nj bitno ne utječu. Zato predmet treba ispitivati u magnetnim poljima koja su međusobno okomita, kako bismo mogli otkriti sve nepravilnosti.


a)

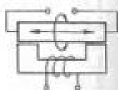
a) Za poprečno smještene nepravilnosti magnetiziramo predmet pomoću magneta ili električnog svitka. Magnetno je polje usmjereno uzduž predmeta te otkriva poprečne nepravilnosti.


b)

b) Za uzdužne nepravilnosti uključujemo predmet kao otpornik u električni vod toka jake struje (200 ... 1 500 A). Tok struje inducira okomito na svoj smjer (tj. poprečno) magnetno polje, koje otkriva uzdužne nepravilnosti. Ako je predmet šupalj, provlačimo električni vodič kroz šupljinu.



Šuplji predmet možemo uporabiti i kao sekundarni namot transformatora pa time u njemu otkrivamo poprečne nepravilnosti (lijeva slika).



Kombinirani uređaji omogućuju pregled na oba način (desna slika).

Ispitivanje ultrazvukom

Ultrazvuk je mehaničko titranje čestica frekvencijom $f > 20$ kHz. U biti on ima ista svojstva kao i čujni zvuk ($f = 16 \dots 20\,000$ Hz).

Ultrazvuk dobivamo na različite načine. Za ispitivanje tvari najčešće rabimo piezoelektrični efekt, pri kojem dolazi do deformacije kristala djelovanjem električnog polja. Izložimo li takav kristal (pretvornik) djelovanju izmjeničnog električnog napona rastezati će se i stezati s frekvencijom napona. Nastati će mehaničko titranje u frekvencijskom području ultrazvuka.

Ultrazvuk prenosimo u tvar neposrednim dodirom pretvornika i površine predmeta. Kroz homogenu tvar ultrazvuk prodire ovisno o prigušenju u njoj (α).

Prigušenje ultrazvuka ovisno je o njegovoj frekvenciji i o tvari. Ultrazvučni val prodire do suprotne plohe predmeta (stijenke) i od nje se odbija. Tako možemo – pomoću reflektiranog ultrazvučnog vala – odrediti debljinu predmeta. Najmanje nepravilnosti u tvari (već i zračni raspor širine od samo 10^{-3} mm) za ultrazvuk su skoro nepremostiva zapreka, to veća što je frekvencija zvuka šira. Na tim se zaprekama ultrazvuk odbija, a reflektirani ultrazvuk ih otkriva.

Ispitivanja rendgenskim zrakama

Rendgenske su zrake elektromagnetski valovi duljine 0,2 do 0,002 nm. Zrake veće valne duljine (oko 0,1 nm) nazivamo »mekim«, a one manje valne duljine »tvrdim«. Što su rendgenske zrake tvrđe, to je njihova prodornost kroz tvar veća.

Rendgenske zrake, koje dobivamo rendgenskim cijevima, rabimo za ispitivanje tvari:

a) finostrukturno ispitivanje utemeljeno na svojstvu rendgenskih zraka da se u kristalima ogibaju i odbijaju (difrakcija X zraka). Tako otkrivamo razmještaj atoma u kristalima i smjer osi kristala;

b) grubostrukturno ispitivanje utemeljeno na svojstvu rendgenskih zraka da ih tvari manje gustoće slabije apsorbiraju nego gušće tvari. Rendgenske zrake, izviru gotovo iz točke i šire se pravocrtno, bacaju na fluorescentni zaslon ili na fotografsku ploču sjene različite jakosti, ovisno je li tvar gušća ili rjeđa, i tako ocrtavaju njihove oblike. Na taj način opažamo – bez oštećivanja tvari – pogrješke u nutrini tvari (šupljine, pukotine, trosku itd.). Najfinije pak pukotine (koje otkrivamo ultrazvukom) ne možemo zapaziti rendgenskim zrakama.

Pri ispitivanju rendgenskim zrakama rabimo uređaj u kojemu je rendgenska cijev pod naponom od 80 ... 300 kV (iznimno i do 600 kV).

Optimalni radni napon rendgenske cijevi koji zavisi od ispitivane tvari, primijenjenog filma i folije

Napon kV	Debljina tvari, mm		
	čelik	Al	bronca
50 – 60	6	50	
80 – 120	12,5	100	12,5
120 – 150	25	200	
150 – 250	50		25
250 – 400	100		100

Ispitivanje γ-zrakama

γ-zrake su elektromagnetski valovi duljine oko 0,000 5 nm (=0,5 pm). Te su zrake »tvrđe« od rendgenskih i stoga dublje prodiru u tvar. Izvori

γ-zraka su prirodni ili umjetni radioaktivni izotopi radija (^{226}Ra), kobalta (^{60}Co), iridija (^{192}Ir), tulija (^{170}Tu) i cezija (^{137}Cs). Tih zraka možemo ispitivati tvar do debljine 250 mm.

Penetrantsko ispitivanje

Ova se metoda rabi za otkrivanje površinskih nepravilnosti pomoću obojenih i fluorescentnih tekućih penetranata. Primjenom odgovarajućeg postupka, penetrant će najvišeg razreda osjetljivosti na ispitnoj površini stvoriti za oko vidljivu indikaciju i za površinske pukotine širine 1 μm, dubine 10 μm te duljine 100 μm. Indikacije obojenih (crvenih) penetranata promatraju se pod dnevnim svjetlom (bijelo svjetlo), a indikacije fluorescentnih penetranata pod UV svjetlom (ultraljubičasto – »crno svjetlo«).

Penetrantsko ispitivanje najčešće se primjenjuje u ispitivanjima nemagnetnih kovina, npr. austenitnih čelika te lakih slitina.

ISPITIVANJE SASTAVA TVARI

Kemijska analiza

Kemijskom analizom određujemo kvalitativni i kvantitativni sastav tvari. Za određivanje glavnih sastojaka dovoljno je nekoliko grama tvari; za određivanje primjesa i nečistoća potrebno je 10 do 50 g, u iznimnim slučajevima pri analizi male količine nečistoća i do 1 kg.

Za brzo određivanje pojedinih elemenata u tvari služimo se različitim postupcima karakterističnih površinskih reakcija, koje međutim otkrivaju samo sastav površinskog sloja.

Spektralna analiza

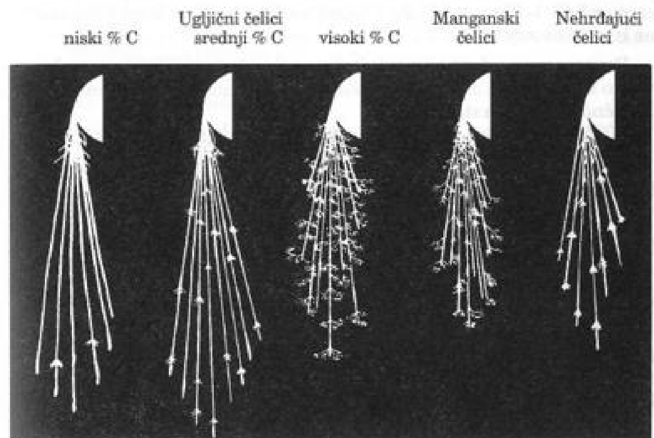
U užarenom stanju atomi emitiraju svjetlosne zrake koje imaju za svaki element karakteristične valne duljine. Odgovarajuće spektralne crte ovise samo o kemijskom sastavu, dok njihova intenzivnost ovisi o udjelu pojedinih elemenata u ispitivanoj tvari. Osjetljivost je toga postupka veoma velika i na taj se način mogu odrediti elementi količine 0,01 % i manje. Zato je taj postupak osobito prikladan kod manjih koncentracija.

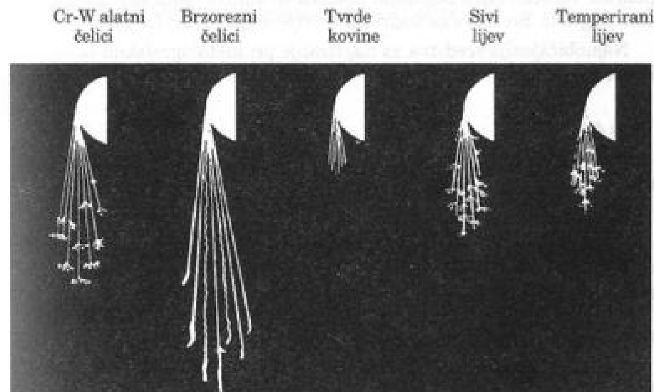
Spektralna je analiza ograničena na veoma usko područje užarenog mjesta na površini tvari. To, međutim, omogućuje i analizu sitnih stranih primjesa u njoj.

Spektralnom analizom možemo nadomjestiti kvalitativnu, a u ograničenom opsegu i kvantitativnu kemijsku analizu. Za nju dostaju veoma mali djelići tvari; možemo je primijeniti i na gotovim predmetima, a da ih time ne oštetimo. Ako pak za spektralnu analizu izrađujemo posebne ispitne uzorke, njihove su prikladne izmjere 30 × 5 × 1 mm.

Ispitivanje iskrenjem pri brušenju

Za brzo, a grubo, razlikovanje pojedinih vrsta čelika, sivog i temperiranog lijeva te tvrdih kovina pomažu nam slike i boje pri brušenju, značajne za pojedinu tvar.





Ugljični se konstrukcijski čelici mogu po iskrama razlikovati za svakih 0,1 % C. Meki čelici daju snop iskara u obliku buzdovana s rijetkim zvjezdicama. S porastom količine C množe se i za nj karakteristične zvjezdice. Cr, Ni i W u čeliku smanjuju broj zvjezdica unatoč nazočnosti C. Cr se u čeliku prepoznaje po žutocrvenim iskrama, W po njihovoj tamnocrvenoj boji (brzorezni čelici!). Tvrde kovine imaju vrlo kratke tamnocrvene iskre, bez zvjezdica.

Prepoznavanje čelika i srodnih kovina po brusnim iskrama zahtijeva veliko iskustvo. Za olakšano prepoznavanje rabimo usporedbene komade za točno poznate vrste čelika.

Ispitivanje iskrenjem ne možemo primijeniti na neželjezne kovine i slitine.

Za ispitivanje iskrenjem rabimo polutvrdu brusnu ploču veličine zrna 60 ... 80 pri brzini brušenja 20 ... 35 m/s.

Metalografski pregledi

Makroskopski pregled (pri povećanju do npr. 20 puta) otkriva šupljine, mjehure, pukotine, trosku, pogrješke u valjanju itd.

Mikroskopski pregled (pri povećanju do 1 000 puta i više) otkriva mikrostrukturu (raspored, oblik i veličinu zrna), koja je ovisna o kemijskom sastavu i uvjetima skrućivanja te o naknadnoj obradbi tvari (toploj i hladnoj).

Da bi struktura postala vidljivom, moramo površinu pokusnog predmeta izbrusiti brusnim papirom i to uvijek finijim, te konačno najfinije polirati. Za otkrivanje pojedinih dijelova strukture mora se polirana površina nagristi. Sredstva za nagrizanje ovise o vrsti tvari i svrsi pregleda.

Najuobičajenija sredstva za nagrizanje pri metalografskim ispitivanjima su:

za čelik

– za nelegirane i legirane čelike: 2 %-tna (za posebne slučajeve 4 %-tna) alkoholna otopina dušične kiseline

– za nehrđajuće kromne čelike: alkohola otopina solne kiseline

– za austenitne čelike: zlatotopka (carska vodica) sastava: 8 cm^3 dušične kiseline (1,40), 12 cm^3 solne kiseline (1,19) i 1 000 cm^3 alkohola ili pak američko sredstvo: 7 ... 8 cm^3 koncentrirane dušične kiseline, 2 ... 3 cm^3 koncentrirane solne kiseline i 0,5 g bakrenog klorida ($CuCl_2$) (to je sredstvo kratkog trajanja)

– za otkrivanje fosfornih segregata: Oberhofferovo sredstvo – 0,5 g kositrenog klorida ($SnCl_2$), 1,0 g bakrenog klorida ($CuCl_2$), 30 g željeznog klorida ($FeCl_3$), 30 cm^3 solne kiseline (1,19), 500 cm^3 destilirane vode i 500 cm^3 etilnog alkohola

– za otkrivanje sumpornih segregata – Baumannov postupak: fotografski se papir (srebrni bromid) stavi kratko vrijeme u 5 %-tnu sumpornu kiselinu, a potom na staklenu ploču sa slojem prema gore. Na sloj pritiskujemo pomno očišćenu brušenu plohu ispitivanog dijela 1 do 10 min, a potom papir brzo isperemo vodom i konačno fiksiramo u normalnoj fiksirnoj kupki ($Na_2S_2O_3$)

za bakar i bakrene slitine

– za bakar i α-mjed: 10 g amonijeva persulfata otopljenog u 100 cm^3 vode (otopina mora biti uvijek svježe pripremljena)

– za bakar, α-β-mjed i broncu: amonijačna otopina bakrenog klorida (10 g bakrenog amonijeva klorida otopi se u 120 cm^3 destilirane vode i doda toliko otopine amonijaka da se prije nastali talog upravo otopi)

za olovo i olovne slitine

– otopina od 16 (ili 8) cm^3 dušične kiseline (1,40), 16 (ili 8) cm^3 octene kiseline i 68 (ili 84) cm^3 glicerina

za aluminij i aluminijske slitine

– najprije 1 g natrijeve lužine u 100 cm^3 vode, zatim 5 %-tna dušična kiselina

za magnezij i magnezijske slitine

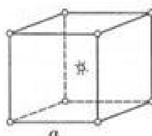
– razrijeđena alkoholna otopina dušične kiseline.

KOVINSKE TVARI

Kristalna struktura kovina

Sve kovine u krutom stanju imaju kristalnu strukturu. Njeni najčešći oblici su (izmjere u nm):

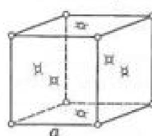
Kubična prostorno centrirana rešetka



Kovina	Izmjera a	Promjer atoma d
Fe_α	0,286	0,248
Cr	0,288	0,250
V	0,303	0,262
Mo	0,314	0,272
W	0,316	0,274

Također: Fe_δ, Ti_β, Rb, Nb, Ba, Ta.

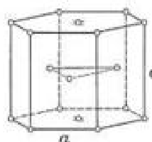
Kubična plošno centrirana rešetka



Kovina	Izmjera a	Promjer atoma d
Fe_γ	0,356	0,252
Ni	0,352	0,248
Cu	0,362	0,256
Al	0,405	0,286
Pb	0,495	0,350

Također: Co_β, Sr, Rh, Pd, Ce, Ag, Au, Pt, Ir.

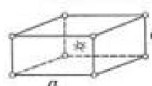
Heksagonalna gusto slagana rešetka



Kovina	Izmjera a	Izmjera c	Promjer atoma d
Co_α	0,251	0,407	0,250
Ti_α	0,295	0,473	0,292
Zn	0,266	0,294	0,260
Mg	0,320	0,520	0,320

Također: Zr, Tc, Ru, Cd, Gd, Re, Os, Tl.

Tetragonalna rešetka



Kovina	Izmjera a	Izmjera c	Promjer atoma d
Sn_β	0,583	0,318	0,302

As, Sb, Te i Bi imaju kompleksnu kristalnu strukturu.

Neke se kovine mogu pojaviti u više kristalnih oblika – *modifikacija* (polimorfizam). Promjena modifikacije – *pretvorba* – javlja se pri određenoj temperaturi, npr.

$Fe_\alpha - Fe_\gamma$: 910 °C $\quad$ $Co_\alpha - Co_\beta$: 420 °C

$Fe_\gamma - Fe_\delta$: 1 390 °C $\quad$ $Ti_\alpha - Ti_\beta$: 882 °C

Mn i In kristaliziraju kubično i ortorompski.

Slitine (legure)

Slitine su sastavljene od najmanje dviju sastavnica od kojih je barem jedna kovina, dok je druga sastavnica kovina, nekovina ili spoj. Legiranjem postižemo mehanička i druga fizikalna ili kemijska svojstva kovinskih tvari koje čiste kovine nemaju.

Slitinama nazivamo samo takve kovinske tvari kod kojih nekoj kovini namjerno dodajemo druge (kovinske ili nekovinske) sastojke.

Kovinskim tvarima nenamjerno dodane (npr. pri dobivanju) druge sastavnice, uglavnom u malim količinama, ubrajamo u nečistoće.

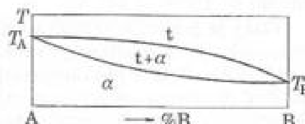
Slitine nastaju od sastavnica u tekućem stanju – taljevini – međusobno otapaju. Sastavnice koje se međusobno otapaju i u čvrstom stanju stvaraju *kristale mješance*, i to u slučaju potpune topljivosti u svim omjerima (koncentracijama) i u slučaju djelomične topljivosti samo do određenog sastava – zasićenja. Slitine sastava koji prelazi granicu zasićenja mogu se sastojati samo od smjese kristala mješanaca ili smjese kristala mješanaca i međukovinskih spojeva. Mnoge slitine tvore (pri najnižoj temperaturi skrućivanja) osobito sitnozrnatu smjesu kristala mješanaca – *eutektik*.

Binarni sustavi slitina (sustavi slitina s dvjema sastavnicama)

Binarne (dvojne) sustave slitina prikazujemo faznim dijagramima temperatura – sastav. U sljedećim dijagramima temeljnih binarnih sustava znače: t – taljevinu, A i B – slitinske sastavnice, α i β – kristale mješance čvrste (otopine B u kristalnoj rešetki A, odn. A u rešetki B), E – eutektik.

Sustav potpune topljivosti

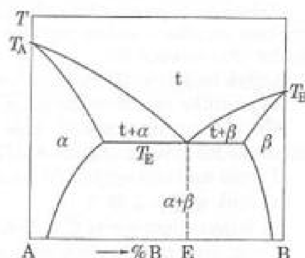
Sastavnice A i B otapaju se međusobno u čvrstom stanju u svim mogućim sastavnim omjerima. Slitina je sastavljena od samih homogenih kristala mješanaca (α).



Sustav djelomične topljivosti

Sastavnice A i B otapaju se jedna u drugoj samo do određenog sastava (zasićenja). Slitina se do tog sastava sastoji od homogenih kristala mješanaca (α i β), a inače od heterogene smjese kristala (α, β i E). Eutektik (E) je sitnozrnata smjesa kristala α i β u točno određenom omjeru.

Potpune netopljivosti nema ali područja kristala mješanaca (α i β) mogu biti tako neznatna (sastav kristala mješanaca pri zasićenju gotovo je jednak čistoj kovini) da djelomičnu topljivost možemo u tom slučaju zanemariti.



ŽELJEZO I NJEGOVE SLITINE

Čisto željezo

Pri zagrijavanju čistog željeza primjećujemo tri temperaturne (stojne) točke, u kojima određeno vrijeme zastaje porast temperature (zbog unutarnjih kristalnih promjena):

Stojište A_2 (768 °C) (»Curiejeva temperatura«) označuje temperaturnu granicu do koje je željezo magnetično. Na ovoj temperaturi nema promjene kristalne strukture.

Točka pretvorbe A_3 (910 °C) označuje promjenu kristalne strukture α u kubnu plošno centriranu rešetku, koju nazivamo modifikacijom γ (nemagnetična).

Točka pretvorbe A_4 (1 390 °C) označuje promjenu kristalne strukture γ u modifikaciju δ, strukturno identičnu modifikaciji α (nemagnetična).

Talište je čistog željeza 1 534 °C.

Čisto željezo u čvrstom stanju kristalizira prema tome u dva oblika:

a) u kubičnoj prostorno centriranoj rešetci (bcc) (koje obuhvaća kristalno jednake modifikacije α i δ, koje je magnetično do 768 °C, nemagnetično između 768 i 910 °C te između 1 390 i 1 534 °C.

b) u kubičnoj plošno centriranoj rešetci (fcc) kao γ-željezo – Fe_γ između 910 i 1 390 °C, nemagnetično.

U α-željezu otapa se samo vrlo malo ugljika, a u γ-željezu može se otopiti do 2,06 % (1 147 °C).

Čisto je željezo u temperaturi okolice Fe_α razmjerno veoma otporno prema koroziji, prilično je mekano (45 ... 55 HB), male je čvrstoće (180 ... 250 N/mm^2) i vrlo rastezljivo (50 ... 40 %). Zbog male čvrstoće i skupog dobivanja (elektroliza!) njegova je primjena u tehnici neznatna. Najviše iskorišćujemo njegovu izuzetnu sposobnost magnetiziranja.

Tehničko željezo

Tehničko željezo uvijek sadrži ugljik (C) i neznatne primjese, preostale tijekom izradbe – stalne pratioce mangan (Mn) i silicij (Si) te nečistoće fosfor (P) i sumpor (S).

Ugljik ima najveći utjecaj na nelegirano tehničko željezo; već u dijelovima postotka snažno utječe na njegova svojstva.

Pri ugrijavanju željeza, koje sadrži i neznatnu količinu ugljika, opažamo još i (stojnu) točku A_1 (723 °C).

Prema sadržaju ugljika dijelimo tehničke slitine željeza s ugljikom na:

a) čelik sa C > 2,06 %,

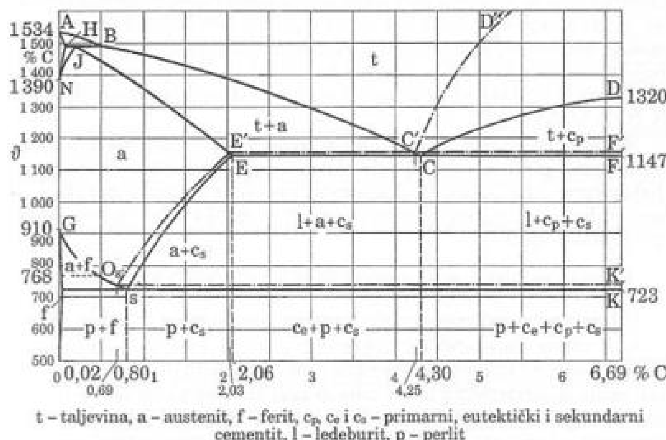
b) željezne lijevove sa C < 2,06 %.

Drugi legirani elementi dodaju se slitinama željeza s ugljikom radi postizanja određenih svojstava.

Sustav željezo – ugljik

Pune linije: *metastabilni sustav* Fe – Fe_3C (željezo – cementit)

Isprekidane linije: *stabilni sustav* Fe – C (željezo – grafit). Kod stabilne kristalizacije (isprekidane linije) umjesto cementita pojavljuju se odgovarajući konstituanti grafita (primarni, eutektički i sekundarni)



t – taljevina, a – austenit, f – ferit, c_p, c_e i c_s – primarni, eutektički i sekundarni cementit, l – ledeburit, p – perlit

Strukturni sastojci u sustavu željezo – ugljik:

ferit	mješanac α-željeza i ugljika (max 0,02 % C)
austenit	mješanac γ-željeza i ugljika (max 2,06 % C)
cementit	kristalni oblik željeznog karbida Fe_3C ((6,69 % C)
ledeburit	eutektik u sustavu željezo – cementit (4,30 % C)
perlit	eutektoid ferita i cementita (0,80 % C)
grafit	kristalni oblik ugljika (C).

Mehanička svojstva sastavnih dijelova mikrostrukture (srednje vrijednosti)

Dio strukture	Čvrstoća R_m/(N/mm^2)	Tvrdoća HV	Istezljivost (%)
ferit	250 ... 300	90	35
austenit	750	210	60
cementit	–	850	–
perlit	700 ... 900	220	10
grafit	20	–	–

Skrućivanje po metastabilnom ili stabilnom sustavu željezo–ugljik

Čelici se sastoje od strukturnih konstituanata metastabilnog sustava.

Lijevano se željezo sastoji od strukturnih konstituanata obaju sustava: metastabilnog i stabilnog. Željezni karbid Fe_3C (cementit) u željeznom lijevu ima metastabilan karakter. On nastaje (bijeli lijev) pri skrućivanju taljevine sirovog željeza u okolnostima koje sprječavaju njegovu pretvorbu, tj. pri razmjerno brzom hlađenju i u prisutnosti izvjesnih elemenata, osobito Mn (te Mo, V, Cr, S). Pri polaganom hlađenju (ili duljem žarenju) željezni se karbid raspada, a ugljik se izlučuje u obliku kristalnih zrna (listića) grafita. Taj raspad pospješuje prisutnost nekih elemenata, osobito Si (te Al, Ni, Co, P).

Pri potpunom izlučivanju ugljika osnovna se masa sastoji od ferita, u kojem zrna grafita sadrže poglavito sav ugljik (feritni sivi lijev). Pri djelomičnom izlučivanju ugljika temeljna se masa sastoji od perlita, koji sam sadrži dio ugljika, a samo se ostatak ugljika izlučuje kao grafit (perlitni sivi lijev).

Utjecaj načina pretvorbe austenita na mikrostrukturu čelika

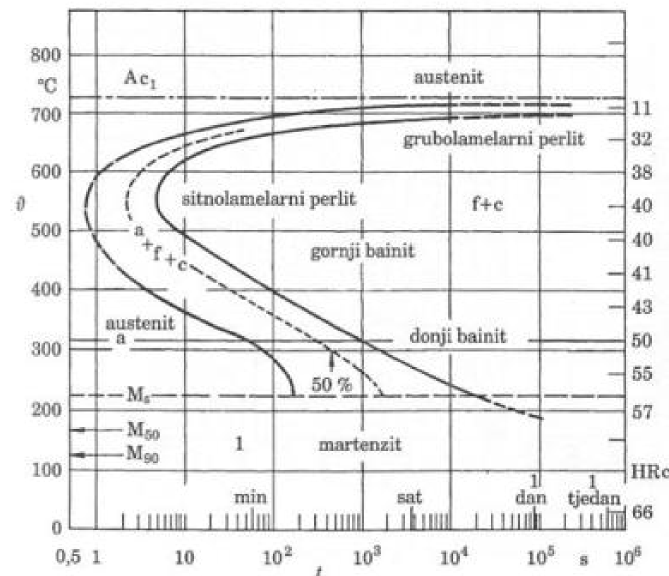
Kod većine najznačajnijih toplinskih obradbi čelik se zagrijava na temperaturu pri kojoj ima austenitnu mikrostrukturu ili je pak, uz austenit, prisutan i razmjerno manji udio drugih mikrostrukturnih sastojaka, npr. karbida. To je temperatura austenitizacije ili pak ona ima naziv prema vrsti toplinske obradbe (npr. temperatura normalizacije). Za većinu toplinskih obradbi austenit je najznačajnija ishodišna mikrostruktura, iz koje se različitim pretvorbama dobiju mikrostrukture koje su postojane na sobnoj temperaturi ili pri povišenim temperaturama. O toj mikrostrukturi ovise svojstva čelika. Pretvorbe austenita provode se izotermički ili pri hlađenju. Brzine pretvorbe austenita i novonastale faze ili mikrostrukturni konstituanti čelika opisuju takozvani izotermički TTT dijagrami[1] (v. str. 387) (također IT dijagrami[2]) i CTT dijagrami[3] (v. str. 388). Način i kinetika pretvorbe austenita ovise o kemijskom sastavu čelika odnosno austenita i o brzini hlađenja i temperaturi pretvorbe. Kod ugljičnih čelika austenit se pretvara u perlit od najviše temperature ≈ 720 °C do ≈ 500 °C. Između te temperature i ≈ 250 °C nastaje bainit samo pri izotermičkoj pretvorbi, a ispod 250 °C samo martenzit.

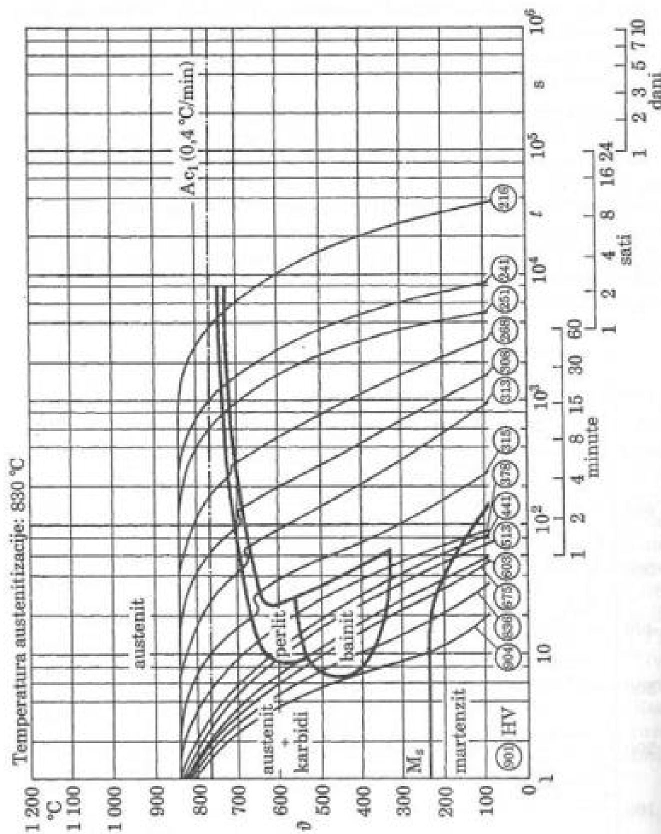
---

1) Time – Temperature – Transformation.
2) Isothermal Transformation.
3) Continuous Cooling Transformation.

Mehanička i tehnološka svojstva čelika s perlitnom mikrostrukturom ovise o debljini cementitnih lamela odnosno o tzv. međulamelarnoj udaljenosti. Što je ona manja, to su viša mehanička svojstva (uključujući duktilnost), dok za vezljivost vrijedi suprotno. Perlit koji nastaje na višoj temperaturi (≈ 700 °C) grubo je lamelaran, dok onaj koji nastaje u području donje granice temperature ima malenu međulamelarnu udaljenost (sitnozrnati perlit).

Svojstva bainita i martenzita ovise o koncentraciji ugljika u čeliku. To je posebno naglašeno kod martenzita koji postiže najvišu tvrdoću (≈ 65 HRC) kad sadrži ≈ 0,7 % ugljika. Niskougljični martenzit, npr. s 0,1% C, ima puno nižu tvrdoću (npr. 37 HRC). Nastali se strukturni konstituanti povišenjem temperature počinju mijenjati. To je najizraženije kod martenzita u kojemu promjene počinju već između 100 °C i 200 °C i postaju to očitije što se temperatura više približava temperaturi Ac_1 (popuštanje čelika). Martenzit u legiranim čelicima otporniji je popuštanju od martenzita u ugljičnim čelicima.

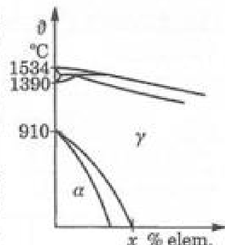




Utjecaj elemenata na strukturu čelika

1. *Elementi koji proširuju austenitno područje*

U tu skupinu spadaju naročito Mn, Ni i Co. (Ugljik proširuje austenitno područje samo u ograničenom opsegu.)

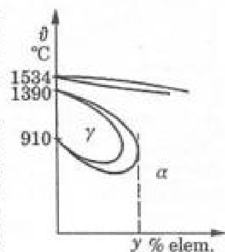


Austenitno se područje proširuje i postiže temperaturu okolice pri određenom sadržaju x (%) elementa, dodanog za legiranje. Slitine sa sadržajem dodanog elementa većim od x imaju, dakle, austenitnu strukturu postojanu približno sobnoj temperaturi. Takve čelike nazivamo »austenitnim čelicima«.

Značajna su svojstva austenitnih čelika da nisu magnetični; ne mogu se kaliti; čvrstoća i tvrdoća su im doduše razmjerno malene, ali ti čelici pri većim deformacijama u hladnom stanju neobično otvrdnu i postaju vrlo otporni prema trošenju; otporni su prema koroziji.

2. *Elementi koji suzuju austenitno područje*

Tu spadaju Be, Al, Si, P, Ti, V, Cr, Mo, W.



Austenitno je područje suženo. Iznad određenog sastava γ, ni pri kojoj se temperaturi više ne pojavljuje austenit, već je na svim temperaturama samo ferit. Takve čelike nazivamo »feritnim čelicima«.

Značajna su svojstva feritnih čelika: nekaljivost, naginju grubozrnatosti, istezljivost im je u hladnom stanju manja od austenitnih čelika pa zato pri hladnom gnječenju i manje otvrdnu i otporni su prema koroziji. Posebno kvalitetni, dobri za oblikovanje hladnom deformacijom i otporni prema koroziji su tzv. superferitni čelici s jako malo C i N.

3. *Elementi koji tvore karbide*

Neki elementi tvore neposredno sa ugljikom (C) karbide. Pri tome su osobito važni Cr, W, Mo, V, Ti itd.

Karbidi tih kovina su značajni zbog tvrdoće i velikog utjecaja na usporenje pretvorbe strukture čelika. Ugrijani do austenitnog područja otapaju se u njemu polagano. Sprječavaju rast kristala i time podupiru nastanak finozrnate strukture. Uz brzo hlađenje pri kaljenju se ti karbidi ne izlučuju, već ostaju otopljeni u martenzitu. Time smanjuju kritičnu brzinu hlađenja potrebnu za nastanak martenzita (što omogućuje kaljenje u ulju ili na zraku) te povisuju temperaturu postojanosti martenzita pri popuštanju, sprječavaju dakle raspad tvrde martenzitne strukture i na višim radnim temperaturama.

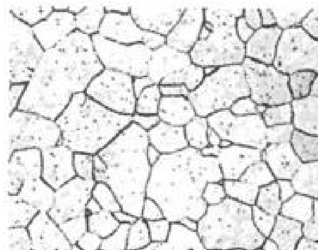
Jako legirani čelici (Cr i W) koji sadrže višestruke karbide (»ledeburitni čelici«), vrlo su tvrdi i veoma otporni prema trošenju jer karbidi istodobno spriječavaju raspadanje martenzita i zadržavaju tvrdoću (kaljenog) čelika i radom na višim temperaturama (brzorezni čelici).

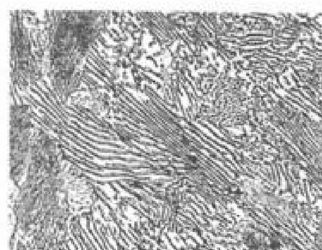
Utjecaj legirnih elemenata na svojstva čelika

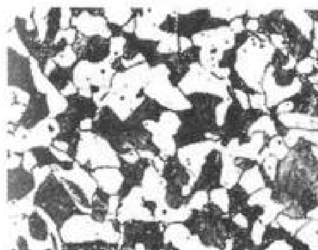
Svojstva čelika	Legirni elementi												
	C	S	P	Si	Mn	Al	Ni	Cr	Mo	W	V	Ti	Co
Čvrstoća	+ +		+	+	+	+	+	+ +	+	+	+	+	+
Tvrdoća	+ +			+	+	+	+	+ +	+	+	+	+	+
Istezljivost	–	–			+ +	– –	+	+					–
Elastičnost	+ +		+	+ +	+		+	+	+		+ +		
Udarna žilavost	–	– –	– –	–	+ +	– –	+		+ +		+ +	– –	
Statička izdržljivost (pri višim temperaturama)	+		+	+	+	+	+		+ +	+ +	+	+	+
Dinamička izdržljivost					+	–		+	+ +	+ +	+ +	+ +	+
Otpornost kemijskim utjecajima	–	– –	+ +	+	+	+	+ +	+ +	+		+	+	+
Otpornost prema vatri	+			+	–	+ +		+	–		–		
Sposobnost izvlačenja	– –	–	– –	– –	–		– –	–		–	– –		
Sposobnost kovanja	–	–	+	– –									
Sposobnost zavarivanja	–	–	–	–								+	
Sposobnost obrađivanja	–	+ +	+	–	–	– –	–	–		–		–	
Sposobnost rezanja (alat)	+ +			+		+		+	+	+	+ +	+	+
Otpornost prema popuštanju								+	+	+ +	+ +	+	+

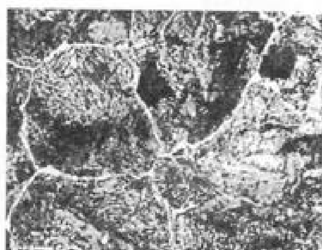
U tablici » + « znači utjecaj u smislu povećanja odgovarajućeg svojstva čelika, a » – « znači smanjivanje tog svojstva. Dvostruki znakovi znače pojačan utjecaj.

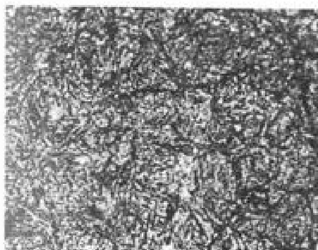
Strukture čelika

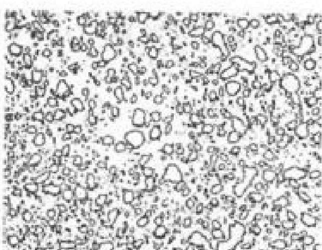

Ferit (500 : 1)


Perlit (500 : 1)


Ferit i perlit 0,35 % C (500 : 1)

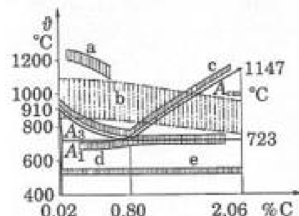

Perlit i cementit 1,1 % C (500 : 1)


Martenzit (500 : 1)


Zrnati cementit (500 : 1)

TOPLINSKA OBRADBA ČELIKA

Žarenje čelika



Žarenje ugljičnog (nelegiranog) čelika
a) difuzijsko žarenje
b) ugrijavanje radi kovanja
c) normalizacija
d) meko žarenje
e) žarenje za smanjenje zaostalih naprezanja

Žarenje je postupak grijanja čelika na određenoj temperaturi određeno vrijeme i zatim ga primjereno hladimo do željene mikrostrukturne promjene. Različitim postupcima žarenja postižemo izjednačenje kemijskog sastava i kristalne strukture, povećanje žilavosti, smanjenje veličine kristalnih zrna, smanjenje tvrdoće čelika ili smanjenje zaostalih naprezanja.

Pri žarenju čelika vrlo su važne temperature strukturnih promjena: A_3 (linija G–O–S u sustavu željezo–ugljik, vidi str. 385) – kao donja granica austenitnog područja, i A_1 (723 °C za ugljične čelike) – kao granica pretvorbe austenita u perlit. Za legirane su čelike odgovarajuće temperature navedene u tablicama za čelik.

1. Difuzijsko žarenje je dugotrajno žarenje čelika pri visokim temperaturama radi izjednačenja kemijskog sastava i nejednolične strukture nastale pri lijevanju, a koja otežava obradbu i smanjuje vrijednost proizvoda. To se žarenje redovito izvodi već u izradbi čelika.

Grubozrnata struktura nastala prilikom difuzijskog žarenja može se usitniti gnječenjem u toplom stanju ili normalizacijom.

2. Ugrijavanje radi topla gnječenja (kovanja, tiskanja, valjanja itd.)

Kristali čelika nastali iz taljevine primarnom kristalizacijom ili narasli difuzijskim žarenjem su grubozrnati. Oni mogu postati mnogo finiji gnječenjem u toplom stanju.

Pri pravilnom gnječenju tvar mora biti potpuno prognječena. Gnječenje dopire dublje pri valjanju i tiskanju nego pri kovanju. Zato je pozornost pri ugrijavanju za kovanje osobito važna.

3. Normalizacija

Gruba struktura u čeličnim odljevcima, koji se zbog održanja oblika ne mogu gnječiti, i gruba struktura u velikim otkovcima, koji se kovanjem ne mogu do srži prognječiti, ostaje pri hlađenju ispod granice austenitnog područja A_3 u novoj, perlitno-feritnoj strukturi također grubozrnata. Tu mikrostrukturu možemo normalizacijom učiniti finijom.

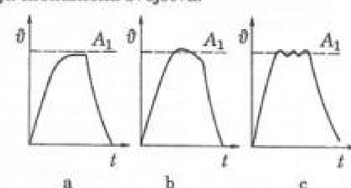
Tim se postupkom čelik zagrije 30 ... 50 °C iznad temperature pretvorbe A_3, i to kratko vrijeme – tek toliko da se struktura upravo promijeni opet u austenitnu. Pri toj se pretvorbi stvaraju novi fini austenitni kristali, koji se zatim normalnim zračnim hlađenjem pretvaraju u kristale ferita i perlita, a oni zadržavaju finu strukturu i u temperaturi okolice.

Previsokom temperaturom ili predugim grijanjem u austenitnom području kristali bi opet narasli te bi korist normalizacije propala. Pregrijani se grubozrnati čelik može ispravnom normalizacijom opet poboljšati.

Normalizacijom se poboljšavaju mehanička svojstva.

4. Meko žarenje

Određene vrste čelika žarimo da bismo dobili što mekaniji čelik prikladan za mehaničku obradbu. To je stanje polazište za ispravno kaljenje bez opasnosti deformiranja ili pucanja predmeta.



Mekše stanje postižemo:

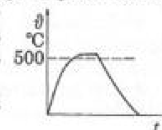
a) u podeutektoidnih čelika duljim grijanjem predmeta (2 ... 20 h) na temperaturi tik ispod perlitne temperture A_1, a zatim hlađenjem (brzina hlađenja nije osobito važna, ali mora biti jednolična);

b) u čelika oko eutektoidnog sastava jednoličnim ugrijavanjem predmeta do temperature A_1, zatim polaganim hlađenjem na 600 ... 650 °C (brzina daljnjeg hlađenja nije osobito važna);

c) u nadeutektoidnih čelika kolebanjem temperatuare oko temperature A_1.

5. Žarenje radi smanjenja zaostalih naprezanja

Nejednolično hlađenje, obradba rezanjem, hladno gnječenje (kovanje, valjanje, izvlačenje) itd. izazivaju zaostala naprezanja u predmetima. Zbog tih se naprezanja predmeti deformiraju ugrijavanjem sve do temperatura na kojima se granica tečenja tvari snizuje ispod zaostalog naprezanja (oslobođena naprezanja izazivaju plastične deformacije).

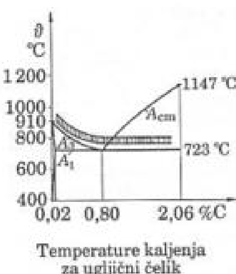


Zaostala naprezanja u čeliku smanjujemo žarenjem pri ≈ 500 (... 600) °C i zatim polaganim hlađenjem.

Kaljenje čelika

1. Obično kaljenje

Kaljenjem nazivamo toplinsku obradbu brzim hlađenjem kaljivih čelika s određene temperature kaljenja (iz područja austenita), pri čemu se stvara posebno tvrda struktura (martenzit).



Temperature kaljenja za ugljični čelik

Temperature kaljenja za pojedine vrste čelika biraju se točno prema podatcima u tablicama. Grijanje do tih temperatura treba biti jednolično cijelim presjekom.

Za dobivanje tvrde strukture kaljenja (martenzita) treba predmet hladiti s temperature kaljenja najmanje »kritičnom brzinom hlađenja«. Ugljični i neki niskolegirani čelici imaju vrlo veliku kritičnu brzinu hlađenja, postignutu samo hlađenjem u vodi. Srednjelegirani čelici imaju kritičnu brzinu hlađenja postignutu u ulju, a za visokolegirane čelike dovoljno je već hlađenje na zraku.

Pri brzom hlađenju pojavljuju se razlike u temperaturama na površini i u dubini predmeta, što – zbog različite temperaturne rastezljivosti – izaziva naprezanja i opasnost od pucanja. Zato nikada ne rabimo sredstva za hlađenje koja djeluju brže nego je to potrebno. Za izradbu predmeta koje treba kaliti biramo po mogućnosti vrstu čelika koja ima manju kritičnu brzinu hlađenja pa se zato može kaliti u rashladnom sredstvu blažeg djelovanja.

Velika unutarnja naprezanja nastala kaljenjem ublažujemo popuštanjem, tj. ugrijavanjem do 180 °C (gdje čelik još ne gubi tvrdoću), i to odmah nakon kaljenja (prije nego se predmet potpuno ohladi do temperature okolice). U tu se svrhu preporučuju uljne ili solne kupke (najmanje 1/2 h).

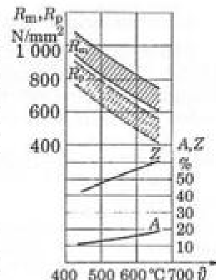
2. Posebni postupci pri kaljenju

a) *Prekinuto kaljenje* rabimo za komplicirane predmete. Hladimo ih najprije u sredstvu koje brže hladi, a kad se dovoljno ohlade (što osigurava nastanak martenzita), hladimo ih dalje u rashladnom sredstvu koje blaže djeluje i time smanjujemo naprezanje.

b) *Stupnjevito kaljenje* (termalno kaljenje) rabimo za komplicirane dijelove od legiranog čelika. Prvo hlađenje obavimo u solnoj ili kovinskoj kupki pri temperaturi malo iznad martenzitne. Time osiguravamo kasnije stvaranje martenzita pri daljnjem hlađenju na zraku (v. izotermički TTT dijagram na str. 387).

3. Poboljšavanje

Mehanička svojstva čelika poboljšavamo posebnim postupkom običnog kaljenja i puštanja pri višim temperaturama (do 680 °C), pri čemu se martenzit raspada u finozrnate međustrukture (trustit, sorbit) do zrnatog cementita. Biranjem temperature popuštanja možemo postići sva željena svojstva čvrstoće između zakaljenog i mekožarenog stanja.



Primjer poboljšavanja čelika
R_m = čvrstoća
$R_{p\,0,2}$ = granica tečenja
A = istezljivost
Z = kontrakcija

Posebnim postupkom poboljšavanja hladimo predmet s temperature kaljenja neposredno u solnoj ili kovinskoj kupki na temperaturi poboljšavanja i zatim ga ostavljamo dulje vrijeme na toj temperaturi (»izotermičko poboljšavanje«, vidi izotermički TTT dijagram na str. 387). Tako nastaje razmjerno žilava struktura (bainit).

4. Površinsko kaljenje

Posebnim načinom grijanja vrlo brzo ugrijavamo površinu predmeta do temperature kaljenja i odmah hlađenjem (dok su dublji slojevi još hladni) zakalimo samo površinski sloj. Time postižemo tvrdu površinu, a jezgra ostaje žilava. Brzo ugrijavanje površine postižemo:

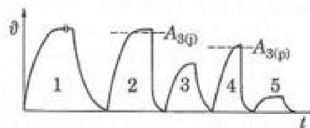
a) *potapanjem predmeta* u solnu kupku na temperaturi mnogo iznad temperature kaljenja,

b) *plamenom*,

c) *visokofrekventnom strujom*, koja zbog unutarnje indukcije ugrijava samo površinu (skin efekt), i to sloj tanji što je viša frekvencija.

5. Cementiranje

Da bismo dobili na žilavom (mekom) čeliku osobito tvrdu površinu, rabimo cementiranje, tj. grijanje pri 870 ... 930 °C u sredstvu za ugljičenje, koje može biti kruto (drveni ugljen s dodatkom $BaCO_3$), tekuće (posebne solne kupke na temelju NaCN) ili plinovito (CH_4). Ugljičenje traje u krutom sredstvu približno 8 h za cementirani sloj dubine ≈ 1 mm koji sadrži ≈ 0,8 % C. U tekućem ili plinovitom sredstvu ugljičenje je znatno kraće.



Predmet treba toplinski obraditi, te ga nakon ugljičenja (1) hladimo i kalimo najprije pri temperaturi kaljenja za jezgru (2), a potom još pri temperaturi kaljenja za pougljičeni površinski sloj (4). Između oba kaljenja može biti dodano još i međužarenje (3). Konačno predmet popuštamo (5) pri najviše 180 °C.

6. Nitriranje

Posebne čelike za nitriranje zagrijavamo 10 ... 100 h u struji amonijaka (NH_3) pri 500 °C. Time dobivamo 0,3 ... 1,0 mm površinski sloj prirodne tvrdoće 900 ... 1100 HV (koja se naglo smanjuje prema jezgri predmeta).

Cijaniranje je nitriranje u posebnoj solnoj kupki (na bazi NaCN), u kojoj pri 500 ... 580 °C tijekom 1 ... 3 h dobivamo nitrirani sloj dubok 0,125 mm tvrdoće 1100 HV.

7. Precipitacijsko očvršćivanje

Kod čelika (≈ 0,3 % C) se određeni legirni elementi (Cr, Ni + Mo, Cu, Al, Nb, Ti, N) pri visokim temperaturama (≈ 1 000 °C) otapaju u Fe. Naglim hlađenjem zadržimo ih u krutoj otopini, a zatim se pri žarenju (≈ 500 °C) izlučuju međukovinske faze (npr. Ni_3Ti) koje očvršćuju čelik.

Opće upute za toplinsku obradbu čelika

1. Zagrijavanje

Čelik se pri zagrijavanju rasteže. Naglo zagrijavanje uzrok je nejednolične temperature različitih dijelova obrađivanog predmeta (tanji se i šiljasti dijelovi i rubovi brže ugriju do viših temperatura), što može izazvati jaka zaostala naprezanja. Pri razmjerno žilavoj tvari naprezanja se ublažuju plastičnom deformacijom i izvijanjem odnosno deformiranjem predmeta (predmet se »izbacuje«), dok se u tvrđoj tvari, osobito u više legiranom čeliku, pojavljuju pukotine jer je tada toplinska vodljivost manja.

Zato čelik sklon pucanju treba zagrijavati opreznije. Tvrde i legirane čelike, osobito alatne, moramo zagrijavati polako od temperature okolice do 400 ... 500 °C. Odatle čelik postaje duktilniji pa ga zato možemo i brže zagrijavati.

2. Temperatura zagrijavanja

Da bismo postigli što bolje rezultate toplinske obradbe, potrebno je što je moguće točnije postići temperaturu, određenu za pojedini postupak.

Temperaturu možemo točno odrediti samo različitim mjerilima temperature:

a) Živini se termometri rabe do 500 °C.

b) Termoelementi se izrađuju za različita temperaturna područja (npr. do 800, 1 000, 1 500 °C).

c) Optički se termometri (pirometri) rabe do najviših temperatura.

Osim navedenih instrumenata za mjerenje temperature, neophodnih za predmete s većim zahtjevima, za jednostavnije predmete i s manjim zahtjevima, temperaturu možemo ocijeniti po boji užarenog čelika (v. ljestvicu boja užarenog čelika na poleđini ovitka ovog priručnika).

U praksi često ocjenjujemo temperature čelika pri popuštanju u temperaturnom području od 200 do 350 °C po oksidacijskim bojama (v. ljestvicu boja pri popuštanju čelika!). Boje koje odgovaraju pojedinim temperaturama popuštanja vrijede za većinu čelika, no ne vrijede za nehrđajuće čelike u kojih su temperature pripadnih boja znatno više.

3. Trajanje grijanja

Za toplinsku je obradbu veoma važno i trajanje grijanja predmeta na određenoj temperaturi. To ovisi o debljini stijenki predmeta, njegovoj toplinskoj vodljivosti i o sredstvu u kojem predmet grijemo.

Ako je grijanje prekratko, nutrina se debljih predmeta ne ugrije do potrebne temperature, može izostati uvjet za uspješan tijek određenog procesa toplinske obradbe. Ako je pak grijanje predugo, može se pojaviti grubozrnata struktura i smanjivanje količine ugljika u čeliku.

4. Sredstva za zagrijavanje

Ako zagrijavamo predmete samo pri nižim temperaturama do 180 °C (npr. za popuštanje), redovito rabimo kupke mineralnih ulja.

Ako temperatura mora biti visoka, predmete uglavnom ugrijavamo u pećima. U njima su izloženi oksidacijskom djelovanju kisika iz zraka. Otuda i gubitci tvari zbog izgaranja. Oni su veći u električno grijanim komornim pećima nego u plinskim ili naftnim pećima.

Oksidacijski utjecaj atmosfere pri visokim temperaturama najbolje izbjegavamo prikladnom zaštitnom atmosferom ili zagrijavanjem u kupkama. Najčešće rabimo:

solne kupke:		*kovinske kupke:*	
za 250 ... 600 °C	1 dio KNO_3 1 dio $NaNO_3$	za 250 ... 550 °C	2 dijela Pb 3 dijela Sn
za 600 ... 770 °C	1 dio NaCl 1 dio KCl 1 dio $BaCl_2$ 2 dijela $CaCl_2$	za 550 ... 900 °C	Pb
za 770 ... 1 000 °C	3 dijela $BaCl_2$ 2 dijela KCl		
iznad 1 000 °C	$BaCl_2$		

Zagrijavanje u kupkama je brže od zagrijavanja u pećima. Zato su temperaturna naprezanja pri zagrijavanju u kupkama veća, što pri nižim temperaturama (manja žilavost obrađivanih predmeta) povećava opasnost od deformiranja i pucanja.

5. Sredstva za hlađenje

Za gašenje (brzo ohlađivanje s visokih temperatura) rabimo – već prema potrebnoj brzini ohlađivanja (vrsta čelika!) – vodu, ulje ili zrak.

Pri gašenju u vodi kaljenje veoma ovisi o temperaturi i gibanju vode. Potrebno je jako miješanje ili mlaz vode da bi se odstranili nastali mjehuri pare, koji sprječavaju prijelaz topline. (Rashladno se djelovanje vode znatno povećava, dodamo li vodi sol – NaCl).

Pri gašenju u ulju (repičinom ili mineralnom) temperatura ulja u području od 40 do 70 °C nema znatnijeg utjecaja na brzinu hlađenja. Važna je viskoznost ulja, koja pri 20 °C treba iznositi oko 16 (... 50) mm^2/s.

Pri hlađenju zrakom zračni mlaz mora biti potpuno suh, ili pak predmet hladimo na mirnom zraku. Pri osobito sporom hlađenju ukopamo predmet u pepeo ili ga ostavimo u peći da se zajedno s njom ohladi.

ŽELJEZNI LIJEVOVI

Željezni lijevovi imaju obično 2,5 ... 3,5 % C, a razlikujemo:

a) sivi lijev, u kojemu je ugljik sav ili veći dio po cijelom presjeku izlučen kao grafit (C);

b) tvrdi (bijeli) lijev, u kojem je ugljik po cijelom presjeku ili određenom dijelu presjeka potpuno vezan kao željezni karbid (Fe_3C).

Željezni lijevovi sadrže redovito osim ugljika još i manje količine drugih primjesa: Si, Mn, P i S.

Sivi lijev

Obični (nelegirani i niskolegirani) sivi lijev (ISO 185 – 1988)

Vrsta [1] ISO	Epruveta (iz priljevenog uzorka) [2] debljina odljevka $\frac{\delta}{mm}$	vlačna čvrstoća epruvete $\frac{R_{m\,min}}{N/mm^2}$	vlačna čvrstoća odljevka $\frac{R_{m\,min}}{N/mm^2}$	Odljevak debljina $\frac{\delta}{mm}$	Odljevak vlačna čvrstoća [3] $\frac{R_{m\,min}}{N/mm^2}$
100	–	–	–	2,5) ... 10	120
				10) ... 20	90
150	20) ... 40	120	110	2,5) ... 10	155
	40) ... 80	110	95	10) ... 20	130
	80) ... 150	100	80	20) ... 30	115
	150) ... 300	90	–	30) ... 50	105
200	20) ... 40	170	155	2,5) ... 10	205
	40) ... 80	150	130	10) ... 20	180
	80) ... 150	140	115	20) ... 30	160
	150) ... 300	130	–	30) ... 50	145
250	20) ... 40	210	195	4,0) ... 10	250
	40) ... 80	190	170	10) ... 20	225
	80) ... 150	170	155	20) ... 30	205
	150) ... 300	160	–	30) ... 50	185
300	20) ... 40	250	240		
	40) ... 80	220	210	10) ... 20	270
	80) ... 150	210	195	20) ... 30	245
	150) ... 300	190	–	30) ... 50	225
350	20) ... 40	290	280		
	40) ... 80	260	250	10) ... 20	315
	80) ... 150	230	225	20) ... 30	290
	150) ... 300	210	–	30) ... 50	270

[1] Brojčana vrijednost u oznaci vrste sivog lijeva odgovara vlačnoj čvrstoći odvojeno odljevenog uzorka s promjerom 30 mm.

[2] Promjer uzorka: 30 mm za debljinu odljevka ≤ 80 mm
50 mm za debljinu odljevka > 80 mm.

[3] Očekivana vrijednost vlačne čvrstoće (samo orijentacijski).

Ovisnost tvrdoće po Brinellu HB i vlačne čvrstoće R_m običnog sivog lijeva:

$$R_m < 196\ \frac{N}{mm^2} \qquad HB = RH\,(44 + 0{,}724\ R_m)$$

$$R_m \geq 196\ \frac{N}{mm^2} \qquad HB = RH\,(100 + 0{,}438\ R_m)$$

pri čemu je RH karakteristika tvrdoće (= 0,80 ... 1,20), ovisna o sirovini, načinu lijevanja i posebnosti ljevaonice.

Kvalitetni sivi lijev ima manje ugljika, manje grafitne ljuske i bolju temeljnu strukturu, što postižemo promjenom sastava, postupkom taljenja (višom temperaturom pregrijavanja) i cijepljenjem – modificiranjem (cjepivima: ferosilicijem, silikokalcijem Al, CaC_2 i dr., koja djeluju kao umjetne klice i pospješuju sitnozrnato izlučivanje grafita). Cijepljenjem postižemo čvrstoće 300 ... 400 N/mm² (modificirani lijev).

Sivi lijev s kuglastim grafitom dobivamo dodatkom Mg (Ce, Ca), koji dezoksidira taljevinu, i cjepiva na bazi Si, koje unosi u taljevinu klice: izlučuje se kuglasti grafit (nodularni ili sferoidni ili duktilni sivi lijev itd.).

Nodularni lijev (ISO 1083 – 1987)

Vrste i mehanička svojstva

Vrsta ISO	Granica tečenja $\frac{R_{p\,0,2\,min}}{N/mm^2}$	Vlačna čvrstoća $\frac{R_{m\,min}}{N/mm^2}$	Istezljivost $\frac{A_{min}}{\%}$	Tvrdoća HB	Mikrostruktura
350-22	220	350	22	≤ 150	ferit
400-18	250	400	18	130 ... 180	ferit
400-15	250	400	15	130 ... 180	ferit
450-10	310	450	10	160 ... 210	ferit
500-7	320	500	7	170 ... 230	ferit + perlit
600-3	370	600	3	190 ... 270	perlit + ferit
700-2	420	700	2	225 ... 305	perlit
800-2	480	800	2	245 ... 335	perlit
900-2	600	900	2	280 ... 360	bainit

Žilavost nodularnog lijeva

Vrsta stupnja		Temepratura $\frac{\vartheta}{°C}$	Debljina $\frac{\delta}{mm}$	Udarna radnja loma *KV*/J sred. vrijednost tri epruvete	Udarna radnja loma *KV*/J najmanja pojedinačna vrijed.
400-18	A	23 ± 5	30) ... 60	14	11
			60) ... 200	12	9
	AL	– 20 ± 2	30) ... 60	12	9
			60) ... 200	10	7
350-22	A	23 ± 5	30) ... 60	17	14
			60) ... 200	15	12
	AL	– 40 ± 2	30) ... 60	12	9
			60) ... 200	10	7

Austenitni sivi lijev (ISO 2892 – 1973)

Austenitni sivi lijev je otporan prema koroziji i oksidaciji na visokim temperaturama. Vrste L- i S-NiMn 13 7 su nemagnetične.

Vrste i sastav

Vrsta ISO	Sastav % [1] C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu
s lamelarnim grafitom:						
L-NiMn 13 7	< 3,0	2,3	6,5	13,0	< 0,2	< 0,5
L-NiCuCr 15 6 2	< 3,0	1,9	1,0	15,5	1,8	6,5
L-NiCuCr 15 6 3	< 3,0	1,9	1,0	15,5	3,0	6,5
L-NiCr 20 2	< 3,0	1,9	1,0	20,0	1,8	< 0,5
L-NiCr 20 3	< 3,0	1,9	1,0	20,0	3,0	< 0,5
L-NiSiCr 20 5 3	< 2,5	5,0	1,0	20,0	3,0	< 0,5
L-NiCr 30 3	< 2,5	1,5	1,0	30,0	3,0	< 0,5
L-NiSiCr 30 5 5	< 2,5	5,5	1,0	30,5	5,0	< 0,5
L-Ni 35	< 2,4	1,5	1,0	35,0	< 0,2	< 0,5
s kuglastim grafitom:						
S-NiMn 13 7	< 3,0	2,5	6,5	13,0	< 0,2	< 0,5
S-NiCr 20 2	< 3,0	2,3	1,0	20,0	1,8	< 0,5
S-NiCr 20 3	< 3,0	2,3	1,0	20,0	3,0	< 0,5
S-NiSiCr 20 5 2	< 3,0	5,0	1,0	20,0	1,8	< 0,5
S-Ni 22	< 3,0	2,0	2,0	22,5	< 0,5	< 0,5
S-NiMn 23 4	< 2,6	2,0	4,3	23,0	< 0,2	< 0,5
S-NiCr 30 1	< 2,6	2,3	1,0	30,0	1,3	< 0,5
S-NiCr 30 3	< 2,6	2,3	1,0	30,0	3,0	< 0,5
S-NiSiCr 30 5 5	< 2,6	5,5	1,0	30,0	5,0	< 0,5
S-Ni 35	< 2,4	2,3	1,0	35,0	< 0,2	< 0,5
S-NiCr 35 3	< 2,4	2,3	1,0	35,0	2,5	< 0,5

Mehanička svojstva lijeva S-NiMn 23 4 pri niskim temperaturama

Temperatura ϑ / °C	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ / N/mm^2	Vlačna čvrstoća R_m / N/mm^2	Istezljivost A / %	Udarna radnja loma KV / J
+ 20	220	450	35	29
0	240	450	35	31
– 50	260	460	38	32
–100	300	490	40	34
–150	350	530	38	33
–183	430	580	33	29
–196	450	620	27	27

[1] Srednje odn. najveće (<) vrijednosti. - Sve vrste s kuglastim grafitom imaju najviše 0,080 % P.

Mehanička svojstva na sobnoj temperaturi

Vrsta	Tlačna čvrstoća R_m / N/mm^2	Vlačna čvrstoća R_m / N/mm^2	Istezljivost A / %	Tvrdoća HB
L-NiMn 13 7	630 ... 840	140 ... 220	–	120 ... 150
L-NiCuCr 15 6 2	700 ... 840	170 ... 210	2	140 ... 200
L-NiCuCr 15 6 3	860 ... 1 100	190 ... 240	1 ... 2	150 ... 250
L-NiCr 20 2	700 ... 840	170 ... 210	2 ... 3	120 ... 215
L- NiCr 20 3	860 ... 1 100	190 ... 240	1 ... 2	160 ... 250
L-NiSiCr 20 5 3	860 ... 1 100	190 ... 280	2 ... 3	140 ... 250
L-NiCr 30 3	700 ... 910	190 ... 240	1 ... 3	120 ... 215
L-NiSiCr 30 5 5	560	170 ... 240	–	150 ... 210
L-Ni 35	560 ... 700	120 ... 180	1 ... 3	120 ... 140

Vrsta	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ / N/mm^2	Vlačna čvrstoća R_m / N/mm^2	Istezljivost A / %	Udarna radnja loma KV / J	Tvrdoća HB
S-NiMn 13 7	210 ... 260	390 ... 460	15 ... 25	15 ... 27	130 ... 170
S-NiCr 20 2	210 ... 250	370 ... 470	7 ... 20	14 ... 27	140 ... 200
S-NiCr 20 3	210 ... 260	390 ... 490	7 ... 15	12	150 ... 255
S-NiSiCr 20 5 2	210 ... 260	370 ... 430	10 ... 18	14,9	180 ... 230
S-Ni 22	170 ... 250	370 ... 440	20 ... 40	20 ... 33	130 ... 170
S-NiMn 23 4	210 ... 240	440 ... 470	25 ... 45	24,0	150 ... 180
S-NiCr 30 1	210 ... 270	370 ... 440	13 ... 18	17,0	130 ... 190
S-NiCr 30 3	210 ... 260	370 ... 470	7 ... 18	8,5	140 ... 200
S-NiSiCr 30 5 5	240 ... 310	390 ... 490	1 ... 4	3,9 ... 5,9	170 ... 250
Si-Ni 35	210 ... 240	370 ... 410	20 ... 40	20,5	130 ... 180
S-NiCr 35 3	210 ... 290	370 ... 440	7 ... 10	7,0	140 ... 190

Mehanička svojstva lijevova na višim temperaturama

Vrsta	Temperatura ϑ / °C	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ / N/mm^2	Vlačna čvrstoća R_m / N/mm^2	Istezljivost A / %	Statička izdržljivost $R_{m/1000}$ / N/mm^2
S-NiCr 20 2	650	176	250	10,5	84
	760	119	155	15	(39)
S-Ni 22	650	170	197	10	63
	760	117	121	13	(28)
S-NiCr 30 3	650	193	293	7	105
	760	107	186	18	(42)
S-NiSiCr 30 5 5	650	239	337	11	(67)
	760	130	153	30	(21)
S-NiCr 35 3	650	170	286	6,5	(105)
	760	131	175	24,5	(39)

Tvrdi lijev

Lijev s tvrdom korom ima ugljik u jezgri izlučen kao grafit, a u površinskom sloju (kori) vezan kao željezni karbid. Rabi se za valjke i dijelove izvrgnute trošenju.

Bijeli lijev sadrži ugljik po cijelom presjeku vezan kao željezni karbid, a rabi se za mlinske kugle, mlaznice za brizgaljke pijeska i sl.

Legirani sivi lijev (DIN 1665 – 1981)

Legirani sivi lijev je otporan prema trošenju.

Vrste i sastav

Vrsta	Sastav % [1]					
DIN	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
G-x 300 NiMo 3Mg	3,2	2,3	0,4	–	3,0	0,65
G-x 260 NiCr 4 2	2,8	0,5	0,5	1,9	4,1	< 0,5
G-x 330 NiCr 4 2	3,3	0,5	0,5	1,9	4,1	< 0,5
G-x 300 CrNiSi 9 5 2	3,0	1,9	0,5	9,0	5,5	< 0,5
G-x 300 CrMo 15 3	3,0	0,5	0,8	15,5	< 0,7	2,0
G-x 300 CrMoNi 15 2 1	3,0	0,5	0,8	15,5	1,0	2,0
G-x 260 CrMoNi 20 2 1	2,6	0,5	0,8	20,0	1,0	1,7
G-x 260 Cr 27	2,6	1,0	1,0	26,0	< 1,2	< 1,0
G-x 300 CrMo27 1	3,2	0,6	0,8	26,0	< 1,2	1,5

Mehanička svojstva

Vrsta	Tvrdoća			Vlačna čvrstoća
	HV 30	HB	HRC	R_m N/mm²
G-x 300 NiMo 3Mg [2]	300 ... 650	300 ... 610	30 ... 58	700 ... 1 300
G-x 260 NiCr 4 2	450 ... 750	430 ... 690	45 ... 62	320 ... 390
G-x 330 NiCr 4 2	450 ... 750	430 ... 690	45 ... 62	280 ... 350
G-x 300 CrNiSi 9 5 2	450 ... 750	430 ... 690	45 ... 62	500 ... 600
G-x 300 CrMo 15 3	380 ... 750	380 ... 690	39 ... 62	450 ... 1 000
G-x 300 CrMoNi 15 2 1	380 ... 750	380 ... 690	39 ... 62	450 ... 1 000
G- x 260 CrMoNi 20 2 1	380 ... 750	380 ... 690	39 ... 62	450 ... 1 000
G-x 260 Cr 27	380 ... 750	380 ... 690	39 ... 62	560 ... 960
G-x 300 CrMo 27 1	380 ... 750	380 ... 690	39 ... 62	450 ... 1 000

[1] Srednje odn. najveće (<) vrijednosti.
[2] Za tu vrstu lijeva vrijedi granica tečenja $R_{p0,2}$ = 600 ... 1 000 N/mm² i istezljivost A = 1... 8 %.

Toplinska obradba

Vrsta	Meko žarenje [1] °C	Kaljenje [1] °C	Popuštanje °C
G-x 300 NiMo 3Mg	850 ... 920 p	850 z,u,v	250 ... 400
G-x 260 NiCr 4 2	–	prirodno tvrdo u lijevanom stanju	250 ... 300
G-x 330 NiCr 4 2	–		250 ... 300
G-x 300 CrNiSi 9 5 2	–	750 ... 820 z,p	–
G-x 300 CrMo 15 3	930 ... 960 p [2]	930 ... 980 z	200 ... 300
G-x 300 CrMoNi 15 2 1	930 ... 960 p [3]	930 ... 980 z	200 ... 300
G-x 260 CrMoNi 20 2 1	970 ... 1000 p [4]	970 ... 1050 z	200 ... 300
G-x 260 Cr 27	980 ... 1050 p	970 ... 1050 z	200 ... 300
G-x 300 CrMo 27 1	980 ... 1050 p	970 ... 1050 z	300 ... 500

Tvrdoća nakon toplinske obradbe

Vrsta	Tvrdoća HV 30		
	Lijevano [5] min	kaljeno + popušt. min	meko žareno max
G-x 300 NiMo 3Mg	400	550	300
G-x 260 NiCr 4 2	450	520	–
G-x 330 NiCr 4 2	450	520	–
G-x 300 CrNiSi 9 5 2	450	600	–
G-x 300 CrMo 15 3	450	600	400
G-x 300 CrMoNi 15 2 1	450	600	400
G-x 260 CrMoNi 20 2 1	450	600	420
G-x 260 Cr 27	450	550	400
G-x 300 CrMo 27 1	450	600	400

Temperirani lijev (ISO 5922 – 1981)

Temperirani lijev dobivamo žarenjem bijelog lijeva.

Bijeli temperirani lijev ima – nakon žarenja u oksidacijskoj atmosferi (zbog oksidacije ugljika) – na površini bijeli prijelom – ferit, a u sredini debljih predmeta – perlit i žarni grafit.

[1] p - peć, z - zrak, u - ulje, v - voda
[2] Hlađenje: 1 do 8 h (p) do 800 °C, zatim < 40 °C/h (p, z) do 650 °C.
[3] Hlađenje: 1 do 8 h (p) do 800 °C, zatim < 20 °C/h (p, z) do 650 °C.
[4] Hlađenje: 4 do 10 h (p) do 800 °C, zatim < 15 °C/h (p, z) do 700 °C.
[5] Uporaba u lijevanom stanju (bez toplinske obradbe) – kad se ne zahtijeva udarna žilavost.

Crni temperirani lijev ima – nakon žarenja u neutralnoj atmosferi – crni prijelom (zbog ugljika koji se sav izluči u obliku žarnoga grafita).

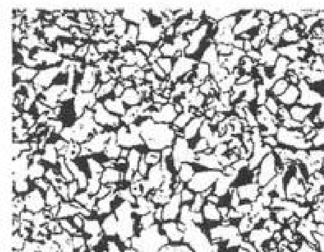
Perlitni temperirani lijev ima nakon žarenja perlitnu maticu (jer dio ugljika ostane vezan u perlitu).

Vrsta ISO	Promjer epruvete $\frac{d}{\text{mm}}$	Granica tečenja $\frac{R_{p\,0,2}}{\text{N/mm}^2}$	Vlačna čvrstoća $\frac{R_m}{\text{N/mm}^2}$	Istezljivost $\frac{A}{\%}$	Tvrdoća HB
Bijeli temperirani lijev					
W 35-04	9 12 15	– – –	340 350 360	5 4 3	< 230
W 38-12	9 12 15	170 200 210	320 380 400	15 12 8	< 200
W 40-05	9 12 15	200 220 230	360 400 420	8 5 4	< 220
W 45- 07	9 12 15	230 260 280	400 450 480	10 7 4	< 220
Crni temperirani lijev					
B 30-06	12 15	–	300	6	< 150
B 35-10	12 15	200	350	10	< 150
Perlitni temperirani lijev					
P 45-06	12 15	270	450	6	150 ... 200
P 55-04	12 15	340	550	4	180 ... 230
P 65-02	12 15	430	650	2	210 ... 260
P 70-02	12 15	530	700	2	240 ... 290

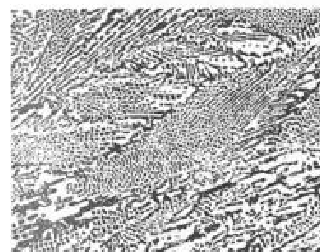
Mikrostrukture lijevova



Čelični lijev poslije lijevanja (100 : 1)



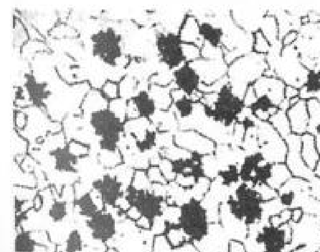
Čelični lijev normaliziran (100 : 1)



Bijeli lijev (200 : 1)



Sivi lijev (500 : 1)



Temperirani lijev – crni (100 : 1)



Sivi lijev nodularni (500 : 1)

VRSTE ČELIKA

Čelici su slitine željeza s ugljikom – do 2,06 % C – ili i s drugim elementima. Pri većem sadržaju dodanih elemenata za legiranje može sadržaj ugljika biti i nešto veći od 2,06 %.

Sve vrste čelika sadrže – iz procesa proizvodnje – još i manje količine Mn, Si, P i S. Čelike koji sadrže Mn < 0,8 % i Si < 0,6 % još ne smatramo legiranim.

Razdioba čelika

1. Prema postupku proizvodnje:

čelike izrađujemo u kisikovim konverterima ili električnim pećima. U industrijski manje razvijenim zemljama još se rabe Siemens-Martinove peći. Temeljna sirovina za izraditi čelik u kisikovim konverterima je tekuće sirovo željezo. U električnim pećima pretaljuje se uglavnom otpadni čelik. Kisikov konverter i električna peć su uređaji za taljenje a rafinacija taline (rafinacijski procesi) teće u raznim reaktorima sekundarne metalurgije ili metalurgije u loncima tj. prema zahtjevu svojstva i kakvoće čelika.

2. Prema kemijskom sastavu:

a) *ugljični čelici* su one vrste čelika u kojima odlučujući utjecaj na svojstva čelika ima ugljik, a drugih elemenata ima samo u količinama koje nemaju bitnog utjecaja, tj.

Mn < 0,80 %,	Cr < 0,20 %,	Co < 0,05 %
Si < 0,60 %,	W < 0,10 %,	Ti < 0,05 %
Ni < 0,30 %,	Mo < 0,05 %,	Al < 0,05 %
Cu < 0,30 %,	V < 0,05 %,	

b) *legirani čelici* su one vrste čelika u kojima odlučujući utjecaj na svojstva čelika imaju legirni elementi, (tj. oni koji se namjerno dodaju da bi se postigla određena svojstva); niskolegirani čelici imaju do 5 % dodanih elemenata, a visokolegirani više od 5 %.

3. Prema uporabi:

a) *konstrukcijski čelici* su ugljični čelici (obični ili plemeniti) sa sadržajem C < 0,6 % ili legirani (uglavnom sa Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V itd.). Rabimo ih za izradbu čeličnih konstrukcija, sastavnih dijelova strojeva, aparata i različitih uređaja. Razlikujemo:

- obične (ugljične ili niskolegirane) čelike za opću masovnu uporabu,
- plemenite (rafinirane) ugljične ili legirane čelike za dijelove s većim zahtjevima (dijelove strojeva itd.);

b) *alatni čelici* su plemeniti ugljični čelici sa sadržajem C > 0,6 % (< 2,06 %) ili legirani (uglavnom sa Cr, W, V, Mo, Co itd.). Rabimo ih za izradbu alata.

Opći konstrukcijski čelici (ISO 630 – 1980 i 1052 – 1982. slEN 10025 – 1989)

Vrste i sastav

Vrsta [1] ISO	Vrsta [1] EN [4]	N [2] d.	Sastav % (max) C	Mn	Si	P	S	N [3]
Fe 310	Fe 310-0	sl	–	–	–	–	–	–
Fe 360 A	–		0,20	–	–	0,060	0,050	–
Fe 360 B	Fe 360 B	sl	0,25	–	–	0,055	0,055	0,011
	Fe 360 B	ns	0,25	–	–	0,055	0,055	0,009
	Fe 360 B	s	0,19	–	–	0,055	0,055	0,011
Fe 360 C	Fe 360 C	s	0,19	–	–	0,050	0,050	0,011
Fe 360 D	Fe 360 D1	ss	0,19	–	–	0,045	0,045	–
	Fe 360 D2	ss	0,19	–	–	0,045	0,045	–
Fe 430 A	–		0,24	–	–	0,060	0,050	–
Fe 430 B	Fe 430 B	s	0,24	–	–	0,055	0,055	0,011
Fe 430 C	Fe 430 C	s	0,21	–	–	0,050	0,050	0,011
Fe 430 D	Fe 430 D1	ss	0,21	–	–	0,045	0,045	–
	Fe 430 D2	ss	0,21	–	–	0,045	0,045	–
Fe 510 B	Fe 510 B	s	0,27	1,70	0,60	0,055	0,055	0,011
Fe 510 C	Fe 510 C	s	0,23	1,70	0,60	0,050	0,050	0,011
Fe 510 D	Fe 510 D1	ss	0,23	1,70	0,60	0,045	0,045	–
	Fe 510 D2	ss	0,23	1,70	0,60	0,045	0,045	–
	Fe 510 DD1	ss	0,23	1,70	0,60	0,045	0,045	–
	Fe 510 DD2	ss	0,23	1,70	0,60	0,045	0,045	–
Fe 490	Fe 490-2	s	–	–	–	0,055	0,055	0,011
Fe 590	Fe 590-2	s	–	–	–	0,055	0,055	0,011
Fe 690	Fe 690-2	s	–	–	–	0,055	0,055	0,011

Udarna radnja loma

Vrsta			Temperatura $\frac{\vartheta}{°C}$	Udarna radnja loma za debljine (mm) 10 ... 150 KV/J	150) ... 250 KV/J
Fe 360 B (s),	Fe 430 B,	Fe 510 B	+20	27	23
Fe 360 C,	Fe 430 C,	Fe 510 C	0	27	23
Fe 360 D1, Fe 360 D2,	Fe 430 D1, Fe 430 D2,	Fe 510 D1 Fe 510 D2	–20	27	23
		Fe 510 DD1 Fe 510 DD2	–20	40	33

[1] Vrste s dodatnim oznakama C i D su kvalitetni čelici. Druge vrste su obični čelici.

[2] Način dezoksidacije: sl - slobodno, ns - nesmireno, s - smireno, ss - specijalno smireno.

[3] Navedene vrijednosti mogu biti i veće, do najviše 0,014 % N, ako se za svakih 0,001 % N više smanji udio P za 0,005 %. - Najveći udio N ne vrijedi ako čelik ima najmanje 0,020 % Al ili odgovarajuću količinu drugih elemenata koji vežu N.

[4] Kvalitete D1 i DD1 - u normaliziranom stanju, kvalitete D2 i DD2 - u stanju nakon postupka proizvodnje.

Mehanička svojstva

Vrsta		Granica tečenja R_e/(N/mm²) za debljine, mm ≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250
Fe 310-0		185	175	–	–	–	–	–	–
Fe 360	B C D1 D2	235	225	215	215	215	195	185	175
Fe 430	B C D1 D2	275	265	255	245	235	225	215	205
Fe 510	B C D1 D2 DD1 DD2	355	345	335	325	315	295	285	275
Fe 490-2		295	285	275	365	255	245	235	225
Fe 590-2		335	325	315	305	295	275	265	255
Fe 690-2		360	355	345	335	325	305	295	285

Vrsta		Vlačna čvrstoća R_m/(N/mm²) za debljine, mm < 3	≥ 3 ≤ 100	> 100 ≤ 150	Istezljivost A % za debljine, mm ≥ 3 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 100	> 100 ≤ 150
Fe 310-0		310...540	290...510	–	18	–	–	–
Fe 360	B C D1 D2	360...510	340...470	340...470	26	25	24	22
Fe 430	B C D1 D2	430...580	410...560	400...540	22	21	20	18
Fe 510	B C D1 D2 DD1 DD2	510...680	490...630	470...630	22	21	20	18
Fe 490-2		490...660	470...610	450...610	20	19	18	16
Fe 590-2		590...770	570...710	550...710	16	15	14	12
Fe 690-2		690...900	670...830	650...830	11	10	9	8

Hladno vučeni nelegirani čelik (ISO 683/XVIII – 1976)

Vrste i sastav

Vrsta ISO	Sastav % [1)] C	Mn	P_{max}	S
C 10	0,07 ... 0,13	0,30 ... 0,60	0,050	< 0,050
C 10 e			0,035	< 0,035
C 10 ea			0,035	0,020 ... 0,035
C 10 eb			0,035	0,030 ... 0,050
C 15	0,12 ... 0,18	0,30 ... 0,60	0,050	< 0,050
C 15 e			0,035	< 0,035
C 15 ea			0,035	0,020 ... 0,035
C 20	0,17 ... 0,23	0,30 ... 0,60	0,050	< 0,050
C 20 e			0,035	< 0,035
C 20 ea			0,035	0,020 ... 0,035
C 20 eb			0,035	0,030 ... 0,050
C 25	0,22 ... 0,29	0,40 ... 0,70	0,050	< 0,050
C 25 e			0,035	< 0,035
C 25 ea			0,035	0,020 ... 0,035
C 25 eb			0,035	0,030 ... 0,050
C 30	0,27 ... 0,34	0,50 ... 0,80	0,050	< 0,050
C 30 e			0,035	< 0,035
C 30 ea			0,035	0,020 ... 0,035
C 30 eb			0,035	0,030 ... 0,050
C 35	0,32 ... 0,39	0,50 ... 0,80	0,050	< 0,050
C 35 e			0,035	< 0,035
C 35 ea			0,035	0,020 ... 0,035
C 35 eb			0,035	0,030 ... 0,050
C 40	0,37 ... 0,44	0,50 ... 0,80	0,050	< 0,050
C 40 e			0,035	< 0,035
C 40 ea			0,035	0,020 ... 0,035
C 40 eb			0,035	0,030 ... 0,050
C 45	0,42 ... 0,50	0,50 ... 0,80	0,050	< 0,050
C 45 e			0,035	< 0,035
C 45 ea			0,035	0,020 ... 0,035
C 45 eb			0,035	0,030 ... 0,050
C 50	0,47 ... 0,55	0,60 ... 0,90	0,050	< 0,050
C 50 e			0,035	< 0,035
C 50 ea			0,035	0,020 ... 0,035
C 50 eb			0,035	0,030 ... 0,050
C 55	0,52 ... 0,60	0,60 ... 0,90	0,050	< 0,050
C 55 e			0,035	< 0,035
C 55 ea			0,035	0,020 ... 0,035
C 55 eb			0,035	0,030 ... 0,050
C 60	0,57 ... 0,65	0,60 ... 0,90	0,050	< 0,050
C 60 e			0,035	< 0,035
C 60 ea			0,035	0,020 ... 0,035
C 60 eb			0,035	0,030 ... 0,050

[1)] Sve ove vrste čelika imaju također 0,15 ... 0,40 % Si.

Normaliziranje

Vrsta	Temperatura $\frac{\vartheta}{°C}$	Vrsta	Temperatura $\frac{\vartheta}{°C}$	Vrsta	Temperatura $\frac{\vartheta}{°C}$
C 20	890 ... 930	C 35	860 ... 900	C 50	830 ... 870
C 25	880 ... 920	C 40	850 ... 890	C 55	825 ... 865
C 30	870 ... 910	C 45	840 ... 880	C 60	820 ... 860

Mehanička svojstva[1]

Vrsta	Normalizirano			Hladno vučeno [2]		
	Granica tečenja $\frac{R_{p\,0,2}}{N/mm^2}$	Vlačna čvrstoća $\frac{R_m}{N/mm^2}$	Istezljivost $\frac{A}{\%}$	Granica tečenja $\frac{R_{p\,0,2}}{N/mm^2}$	Vlačna čvrstoća $\frac{R_m}{N/mm^2}$	Istezljivost $\frac{A}{\%}$
C 10	–	–	–	270	390	13
C 15	–	–	–	300	420	12
C 20	210	400	25	320	450	11
C 25	230	440	23	350	490	10
C 30	250	480	21	370	520	10
C 35	270	520	19	400	560	9
C 40	290	550	17	430	600	9
C 45	305	580	16	450	640	8
C 50	320	610	14	480	680	8
C 55	330	640	12	520	720	7
C 60	340	670	11	540	770	6

Meki čelik za hladno preoblikovanje (EN 10130 – 1989)

Vrste, sastav i mehanička svojstva

Vrsta EN	Sastav % C	P	S	Mn	Ti	Granica tečenja $\frac{R_{p\,0,2}}{N/mm^2}$	Vlačna čvrstoća $\frac{R_m}{N/mm^2}$	Istezljivost $\frac{A}{\%}$
Fe P01	0,12	0,045	0,045	0,60	–	< 280	270 ... 410	28
Fe P03	0,10	0,035	0,035	0,45	–	< 240	270 ... 370	34
Fe P04	0,08	0,030	0,030	0,40	–	< 210	270 ... 350	38
Fe P05	0,06	0,025	0,025	0,35	–	< 180	270 ... 330	40
Fe P06	0,02	0,020	0,020	0,25	0,3	< 180	270 ... 350	38

[1] Vrijede za debljinu 30 mm. Za manje (veće) debljine su $R_{p\,0,2}$ i R_m veći (manji) a A je manja (veća).

[2] Hladno vučeno nakon valjanja ili nakon normaliziranja.

Čelici za tlačne spremnike (EN 10028 – 1989)

Vrste i sastav čelika za povišene temperature

Vrsta EN	Sastav % [1] C	Si_{max}	Mn	P_{max}	S_{max}	Cr	Mo	ostalo
Nelegirani čelici								
SPH 235	< 0,16	0,35	0,80	0,035	0,030	–	–	[2] –
PH 235	< 0,16	0,35	0,80	0,030	0,025	< 0,30	< 0,08	[2][3][4]
SPH 265	< 0,20	0,35	0,90	0,035	0,030	–	–	[2] –
PH 265	< 0,20	0,35	0,90	0,030	0,025	< 0,30	< 0,08	[2][3][4]
PH 295	0,14	0,40	1,20	0,030	0,025	< 0,30	< 0,08	[2][3][4]
PH 355	0,16	0,60	1,30	0,030	0,025	< 0,30	< 0,08	[2][3][4]
Legirani čelici								
16 Mo 3	0,16	0,35	0,65	0,030	0,25	< 0,30	0,30	[3][4]
13 CrMo 4 5	0,13	0,35	0,70	0,030	0,025	0,92	0,50	[4]
10 CrMo 9 10	0,10	0,50	0,60	0,030	0,025	2,25	1,00	[4]
11 CrMo 9 10	0,11	0,50	0,60	0,030	0,025	2,25	1,00	[4]

Mehanička svojstva u normaliziranom stanju (za debljinu 16 mm)

Vrsta	Normaliziranje $\frac{\vartheta}{°C}$	Granica tečenja [5] $\frac{R_{p\,0,2}}{N/mm^2}$	Vlačna čvrstoća $\frac{R_m}{N/mm^2}$	Istezljivost $\frac{A}{\%}$	Udarna radnja loma $\frac{\vartheta}{°C}$	$\frac{KV}{J}$
SPH 235	890 ... 950	235	360 ... 480	25	–20	28
PH 235	890 ... 950	235	360 ... 480	25	0	27
SPH 265	890 ... 950	265	410 ... 530	23	–20	28
PH 265	890 ... 950	265	410 ... 530	23	0	27
PH 295	890 ... 950	295	460 ... 580	22	0	27
PH 355	890 ... 950	355	510 ... 650	21	0	27
16 Mo 3	890 ... 950	275	440 ... 590	24	+20	31
13 CrMo 4 5	890 ... 950 [6]	300	450 ... 600	20	+20	31
10 CrMo 9 10	920 ... 980 [7]	310	480 ... 630	18	+20	31
11 CrMo 9 10	920 ... 980 [8]	310	520 ... 670	18	+20	31

[1] Srednje odn. najveće (max ili <) vrijednosti.

[2] > 0,020 Al.

[3] < 0,30 Ni.

[4] < 0,30 Cu (0,01 Nb, 0,03 Ti, 0,02 V).

[5] Ili R_e.

[6] Popuštanje: 630 ... 730 °C.

[7] Popuštanje: 680 ... 760 °C.

[8] Popuštanje: 670 ... 750 °C.

Granica tečenja pri višim temperaturama (za debljine do 60 mm)

Vrsta	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$/(N/mm²) pri temperaturi °C								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
SPH 235	152	144	136	120	104	–	–	–	–
PH 235	190	180	170	150	130	120	110	–	–
SPH 265	172	164	156	140	124	–	–	–	–
PH 265	215	205	195	175	155	140	130	–	–
PH 295	250	235	225	205	185	170	155	–	–
PH 355	290	270	255	235	215	200	180	–	–
16 Mo 3	–	–	215	200	170	160	150	145	140
13 CrMo 4 5	–	–	230	220	205	190	180	170	165
10 CrMo 9 10	–	–	245	230	220	210	200	190	180
11 CrMo 9 10	–	–	–	255	235	225	215	205	195

Granica tečenja i statička izdržljivost

Vrsta	$R_{p1/t}$, $R_{m/t}$ N/mm²	Temperatura °C										
		400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600
PH 235 PH 265	$R_{p1/10000}$	136	113	91	72	53						
	$R_{p1/100000}$	95	73	57	42	30						
	$R_{m/10000}$	191	158	127	100	75						
	$R_{m/100000}$	132	103	79	59	42						
	$R_{m/200000}$	115	89	67	48	33						
PH 295 PH 355	$R_{p1/10000}$	167	135	107	83	63	49					
	$R_{p1/100000}$	118	92	69	51	38	29					
	$R_{m/10000}$	243	200	161	126	96	74					
	$R_{m/100000}$	179	136	100	73	55	41					
	$R_{m/200000}$	157	115	82	60	44	30					
16 Mo 3	$R_{p1/10000}$				199	166	132	99				
	$R_{p1/100000}$				146	107	73	46				
	$R_{m/10000}$				273	222	171	125				
	$R_{m/100000}$				208	148	101	66				
	$R_{m/200000}$				188	130	84	55				
13 CrMo 4 5	$R_{p1/10000}$				228	193	157	122	90	64		
	$R_{p1/100000}$				172	133	98	70	46	30		
	$R_{m/10000}$				348	304	239	179	129	91		
	$R_{m/100000}$				251	190	137	94	61	40		
	$R_{m/200000}$				226	167	115	76	50	32		
10 CrMo 9 10	$R_{p1/10000}$				219	180	147	119	94	73	57	44
	$R_{p1/100000}$				155	130	103	78	58	41	30	22
	$R_{m/10000}$				286	241	196	156	122	96	75	61
	$R_{m/100000}$				205	170	135	103	78	58	44	34
	$R_{m/200000}$				186	152	120	91	68	50	37	28

Granica puzanja $R_{p1/t}$ je naprezanje (N/mm²), koje izaziva trajno istezanje od 1 % nakon određenog vremena t, h.

Statička izdržljivost $R_{m/t}$ je naprezanje (N/mm²), koje izaziva lom nakon vremena t, h.

Vrste i sastav sitnozrnatih čelika za više i niske temperature

Vrsta EN	Sastav % [1]								
	C	Si_{max}	Mn	P_{max}	S_{max}	Cr	Mo	Ni	ostalo
SPLH 275 N	< 0,16	0,40	0,95			–	–	–	[2]
P 275 N **PH 275 N** **PL 275 N G1** **PL 275 N G2**	< 0,18 < 0,16	0,40	0,95	0,030 0,030 0,030 0,025	0,025 0,025 0,020 0,015	< 0,30	< 0,08	0,30	[2] [3] [5] [6]
P 355 N **PH 355 N** **PL 355 N G1** **PL 355 N G2**	< 0,20 < 0,18	0,50	1,30	0,030 0,030 0,030 0,025	0,025 0,025 0,020 0,015	< 0,30	< 0,08	0,30	[2] [3] [5] [7]
P 420 N **PH 420 N** **PL 420 N G1** **Pl 420 N G2**	< 0,20	0,50	1,35	0,030 0,030 0,030 0,025	0,025 0,025 0,020 0,015	< 0,30	< 0,10	0,80	[2] [3] [5] [8]
P 460 N **PH 460 N** **PL 460 N G1** **PL 460 N G2**	< 0,20	0,50	1,35	0,030 0,030 0,030 0,025	0,025 0,025 0,020 0,015	< 0,30	< 0,10	0,80	[2] [4] [5] [8]

Mehanička svojstva

Vrsta	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Istezljivost A %
(S) P (H, L) 275 N (G1, G2)	275	390 ... 510	24
P (H, L) 355 N (G1, G2)	355	490 ... 630	22
P (H, L) 420 N (G1, G2)	420	540 ... 680	19
P (H, L) 460 N (G1, G2)	460	570 ... 720	17

Granica tečenja na višim temperaturama

Vrsta	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$/(N/mm²) pri temperaturi °C						
	100	150	200	250	300	350	400
SPLH 275 N	188	173	157	141	118	–	–
PH 275 N	235	216	196	177	147	127	108
PH 355 N	294	275	245	226	216	196	167
PH 420 N	353	333	304	275	265	235	206
PH 460 N	392	363	333	314	294	265	235

[1] Srednje odn. najveće (max ili <) vrijednosti.
[2] > 0,020 Al.
[3] < 0,30 Cu.
[4] < 0,70 Cu.
[5] < 0,020 N (0,05 Nb, 0,03 Ti).
[6] < 0,05 Y.
[7] < 0,12 Y.
[8] < 0,20 Y.

Udarna radnja loma na niskim temperaturama

Vrsta	Udarna radnja loma KV/J [1] na temperaturi °C				
	−50	−40	−20	0	+20
SPLH 275 N	28/–	–	–	–	–
P ... N, PH ... N	–	–	40/16	47/27	55/31
PL ... N G1	27/16	31/20	47/27	55/34	63/40
PL ... N G2	30/27	40/30	65/40	90/60	100/70

Čelici za nitriranje (ISO 683/10 - 1987)

Vrste i sastav

Vrsta ISO	Sastav % [2] C	Si	Mn	Al	Cr	Mo	Ni
31 CrMo 12	0,31	< 0,40	0,55	–	3,05	0,40	< 0,30
33 CrAlMo 5 4	0,33	< 0,50	0,65	1,0	1,15	0,20	–
41 CrAlMo 7 4	0,41	< 0,50	0,65	1,0	1,65	0,32	–

Mehanička svojstva u poboljšanom stanju

Vrsta	Promjer D mm	Granica tečenja $R_{e\,min}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Istezljivost A %	Udarna radnja loma KU_{min} J
31CrMo12	< 100	800	1 000 ... 1 200	11	30
	100 ... 250	700	900 ... 1 100	12	30
33CrAlMo54	< 70	600	800 ... 1 000	14	25
41CrAlMo74	< 100	700	900 ... 1 100	12	20
	100 ... 160	600	800 ... 1 000	14	25

Tvrdoća nitrirane površine

Vrsta	Tvrdoća HV	HR15N
31 CrMo 12	800	92
33 CrAlMo 5 4	950	93,5
41 CrAlMo 7 4	950	93,5

Toplinska obradba

Vrsta	Poboljšanje: kaljenje [3] ϑ °C	Poboljšanje: popuštanje ϑ °C	Nitriranje ϑ °C
31 CrMo 12	870 ... 910 u	570 ... 650	490 ... 510
33 CrAlMo 5 4	900 ... 940 u, v	570 ... 650	500 ... 520
41 CrAlMo 7 4	880 ... 920 u	570 ... 650	500 ... 520

[1] Navedene vrijednosti vrijede za uzdužno/poprečne epruvete.
[2] Srednje vrijednosti. – Sve vrste čelika za nitriranje imaju također < 0,030 P i < 0,035 S.
[3] Kaljenje: u - u ulju, v - u vodi.

Čelici za cementiranje (ISO 683/11 – 1987)

Vrste i sastav

Vrsta ISO	Sastav % [1] C	Mn	S	Cr	Mo	Ni
C 15 E4 **C 15 M2**	0,15	0,45	< 0,035 0,020 ... 0,040	–	–	–
20 Cr 4 **20 CrS 4**	0,20	0,75	< 0,035 0,020 ... 0,040	1,05	–	–
16 MnCr 5 **16 MnCrS 5**	0,16	1,15	< 0,035 0,020 ... 0,040	0,95	–	–
20 MnCr 5 **20 MnCrS 5**	0,20	1,25	< 0,035 0,020 ... 0,040	1,15	–	–
18 CrMo 4 **18 CrMoS 4**	0,18	0,75	< 0,035 0,020 ... 0,040	1,05	0,20	–
15 NiCr 13	0,15	0,50	< 0,035	0,85	–	3,25
17 NiCrMo 6	0,17	0,75	< 0,035	0,95	0,20	1,40
18 CrNiMo 7	0,18	0,50	< 0,035	1,65	0,30	1,55

Mehanička svojstva

Vrsta	Granica tečenja [2] za promjere (mm) 16	30	63	Vlačna čvrstoća [3]	Istezljivost [3]	Udarna radnja loma [3]
	$R_{e\,min}$ N/mm²			R_m N/mm²	A %	KU_{min} J
C10	270	250	–	400 ... 700	15	35
C15E4 C15M2	300	260	–	450 ... 750	14	30
20Cr4 20CrS4	550	490	450	750 ... 1 100	9	25
16MnCr5 16MnCrS5	600	520	450	770 ... 1 120	10	25
20MnCr5 20MnCrS5	670	610	540	900 ... 1 250	9	20
18CrMo4 18CrMoS4	600	540	480	820 ... 1 170	10	25
15NiCr13	650	600	550	900 ... 1 250	10	30
17NiCrMo6	700	600	550	900 ... 1 250	9	25
18CrNiMo7	820	780	730	1 080 ... 1 430	7	20

[1] Srednje vrijednosti. Sve vrste čelika imaju 0,15 ... 0,40 % Si i najviše 0,035 % P.
[2] Granica tečenja R_e odn. dogovorna granica tečenja $R_{p\,0,2}$.
[3] Navedene vrijednosti vrijede za promjer 30 mm. Za manje (veće) promjere je R_m veća (manja), a A i KU su manji (veći).

Toplinska obradba

Vrsta	Ugljičenje [1] ϑ / °C	Jednostruko kaljenje ϑ / °C	Dvostruko kaljenje jedra ϑ / °C	Dvostruko kaljenje površine ϑ / °C	Popuštanje ϑ / °C	Čeono gašenje [2] ϑ / °C
C 15 E4 C 15 M2	880 ... 980	830 ... 870	880 ... 920	780 ... 820	150 ... 200	–
20 Cr 4 20 CrS 4	880 ... 980	820 ... 860	860 ... 900	780 ... 820	150 ... 200	900 ± 5
16 MnCr 5 16 MnCrS 5	880 ... 980	820 ... 860	860 ... 900	780 ... 820	150 ... 200	900 ± 5
20 MnCr 5 20 MnCrS 5	880 ... 980	820 ... 860	860 ... 900	780 ... 820	150 ... 200	900 ± 5
18 CrMo 4 18 CrMoS 4	880 ... 980	820 ... 860	860 ... 900	780 ... 820	150 ... 200	900 ± 5
15 NiCr 13	880 ... 980	810 ... 850	840 ... 880	780 ... 820	150 ... 200	900 ± 5
17 NiCrMo 6	880 ... 980	810 ... 850	830 ... 870	780 ... 820	150 ... 200	900 ± 5
18 CrNiMo 7	880 ... 980	810 ... 850	830 ... 870	780 ... 820	150 ... 200	860 ± 5

Prokaljivost

Vrsta	Tvrdoća HRC [3] na udaljenosti od čeone plohe (mm)												
	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40
20 Cr 4 20 CrS 4	49 41	48 38	46 31	42 26	38 23	36 21	34 –	32 –	29 –	27 –	26 –	24 –	23 –
16 MnCr 5 16 MnCrS 5	47 39	46 36	44 31	41 28	39 24	37 21	35 –	33 –	31 –	30 –	29 –	28 –	27 –
20 MnCr 5 20 MnCrS 5	49 41	49 39	48 36	46 33	43 30	42 28	41 26	39 25	37 23	35 21	34 –	33 –	32 –
18 CrMo 4 18 CrMoS 4	47 39	46 37	45 34	42 30	39 27	37 24	35 22	34 21	31 –	29 –	28 –	27 –	26 –
15 NiCr 13	46 38	46 37	46 36	46 34	45 31	44 29	43 27	41 26	38 24	35 22	34 22	34 21	33 21
17 NiCrMo 6	48 40	48 39	47 37	46 34	45 30	44 28	42 27	41 26	38 24	36 23	35 22	34 21	33 –
18 CrNiMo 7	48 40	48 40	48 39	48 38	47 37	47 36	46 35	46 34	44 32	43 31	42 30	41 29	41 29

[1] Temperatura ugljičenja ovisi o kemijskom sastavu čelika, masi izradka, sredstava za ugljičenje; u posebnim slučajima (npr. u vakuumu) je tkđ. viša (npr. 1 020 ... 1 050 °C).

[2] Za pokus s čeonim gašenjem je (za austenitizaciju) potrebno zagrijavanje najmanje 0,5 h.

[3] Gornje i donje brojke znače granične vrijednosti tvrdoće.

Čelici za poboljšavanje (ISO 683/1 – 1987)

Vrste i sastav

Vrsta ISO	Sastav % [1] C	Mn	P_{max}	S	Cr	Mo	Ni, V
C 25 C 25 E4	0,25	0,55	0,045 0,035	< 0,045 < 0,035	–	–	–
C 35 C 35 E4	0,35	0,65	0,045 0,035	< 0,045 < 0,035	–	–	–
C 45 C 45 E4 C 45 M2	0,45	0,65	0,045 0,035 0,035	< 0,045 < 0,035 0,02 ... 0,04	–	–	–
C 55 C 55 E4 C 55 M2	0,55	0,75	0,045 0,035 0,035	< 0,045 < 0,035 0,02 ... 0,04	–	–	–
C 60 C 60 E4 C 60 M2	0,60	0,75	0,045 0,035 0,035	< 0,045 < 0,035 0,02 ... 0,04	–	–	–
22 Mn 6 28 Mn 6 36 Mn6 42 Mn 6	0,22 0,28 0,36 0,42	1,48	0,035	< 0,035	–	–	–
34 Cr 4 34 CrS 4	0,34	0,75	0,035	< 0,035 0,02 ... 0,04	1,05	–	–
37 Cr 4 37 CrS 4	0,37	0,75	0,035	< 0,035 0,02 ... 0,04	1,05	–	–
41 Cr 4 41 CrS 4	0,41	0,75	0,035	< 0,035 0,02 ... 0,04	1,05	–	–
25 CrMo 4 25 CrMoS 4	0,25	0,75	0,035	< 0,035 0,02 ... 0,04	1,05	0,22	–
34 CrMo 4 34 CrMoS 4	0,34	0,75	0,035	< 0,035 0,02 ... 0,04	1,05	0,22	–
42 CrMo 4 42 CrMoS 4	0,42	0,75	0,035	< 0,035 0,02 ... 0,04	1,05	0,22	–
50 CrMo 4	0,50	0,65	0,035	< 0,035	1,05	0,22	–
41 CrNiMo 2 41 CrNiMoS 2	0,41	0,85	0,035	< 0,035 0,02 ... 0,04	0,05	0,22	0,55 Ni
36 CrNiMo 4 36 CrNiMo 6 31 CrNiMo 8	0,36 0,36 0,31	0,65 0,65 0,45	0,035	< 0,035	1,05 1,50 2,00	0,22 0,22 0,40	1,05 Ni 1,50 Ni 2,00 Ni
51 CrV 4	0,51	0,80	0,035	< 0,035	0,95	–	0,18 V

[1] Srednje vrijednosti. – Sve te vrste čelika imaju 0,10 ... 0,40 % Si.

Mehanička svojstva u poboljšanom stanju

Vrsta	Granica tečenja [1] $R_{e\,min}$ N/mm² za promjere mm 16	30	63	Vlačna čvrstoća [2] R_m N/mm²	Istezljivost [2] A %	Udarna radnja loma [2] KU_{min} J
C 25						–
C 25 E4	370	320	–	500 ... 650	21	35
C 35						–
C 35 E4	430	380	320	600 ... 750	19	25
C 45						–
C 45 E4	490	430	370	650 ... 800	16	15
C 45 M2						15
C 55						–
C 55 E4	550	490	420	750 ... 900	14	–
C 55 M2						–
C 60						–
C 60 E4	580	520	450	800 ... 950	13	–
C 60 M2						–
22 Mn 6	550	440	400	650 ... 800	18	30
28 Mn 6	590	490	440	700 ... 850	15	30
36 Mn 6	640	540	460	750 ... 900	14	25
42 Mn 6	690	590	480	800 ... 950	14	30
34 Cr 4 34 CrS 4	700	590	460	800 ... 950	14	30
37 Cr 4 37 CrS 4	750	630	510	850 ... 1 000	13	25
41 Cr 4 41 CrS 4	800	660	560	900 ... 1 100	12	25
25 CrMo 4 25 CrMoS 4	700	600	450	800 ... 950	14	35
34 CrMo 4 34 CrMoS 4	800	650	550	900 ... 1 100	12	30
42 CrMo 4 42 CrMoS 4	900	750	650	1 000 ... 1 200	11	25
50 CrMo 4	900	780	700	1 000 ... 1 200	10	20
41 CrNiMo 2 41 CrNiMoS 2	840	740	640	900 ... 1 100	11	30
36 CrNiMo 4	900	800	700	1 000 ... 1 200	11	30
36 CrNiMo 6	1 000	900	800	1 100 ... 1 300	10	25
31 CrNiMo 8	850	850	800	1 030 ... 1 230	12	35
51 CrV 4	900	800	700	1 000 ... 1 200	10	20

[1] Granica tečenja R_e odn. dogovorna granica tečenja $R_{p\,0,2}$

[2] Navedene vrijednosti vrijede za promjer 30 mm. Za manje (veće) promjere je R_m veća (manja) a A i KU su manji (veći).

Mehanička svojstva u normaliziranom stanju

Vrsta	Granica tečenja [1] za promjere mm 16	30	63	Vlačna čvrstoća [2] $R_{m\,min}$ N/mm²	Istezljivost [2] A_{min} %
	$R_{e\,min}$ N/mm²				
C 25, C 25 E4, C 25 M2	260	230	–	440	23
C 35, C 35 E4, C 35 M2	300	270	245	520	19
C 45, C 45 E4, C 45 M2	340	305	275	580	16
C 55, C 55 E4, C 55 M2	370	330	300	640	12
C 60, C 60 E4, C 60 M2	380	340	310	670	11

Toplinska obradba

Vrsta	Poboljšavanje: kaljenje [3] ϑ °C	Poboljšavanje: popuštanje ϑ °C	Čeono kaljenje [4] ϑ °C	Normaliziranje ϑ °C
C 25, C 25 E4, C 25 M2	860 ... 900 v		–	880 ... 920
C 35, C 35 E4, C 35 M2	840 ... 880 v,u		870 ± 5	860 ... 900
C 45, C 45 E4, C 45 M2	820 ... 860 v,u	550 ... 660	850 ± 5	840 ... 880
C 55, C 55 E4, C 55 M2	805 ... 845 u,v		830 ± 5	825 ... 865
C 60, C 60 E4, C 60 M2	800 ... 840 u,v		830 ± 5	820 ... 860
22 Mn 6	840 ... 900 v	550 ... 650	880 ± 5	–
28 Mn 6	830 ... 870 v,u	540 ... 680	850 ± 5	–
36 Mn 6	820 ... 860 u,v	540 ... 680	840 ± 5	–
42 Mn 6	830 ... 830 u	550 ... 650	845 ± 5	–
34 Cr 4, 34 CrS 4	830 ... 870 v,u		850 ± 5	–
37 Cr 4, 37 CrS 4	825 ... 865 u,v		845 ± 5	–
41 Cr 4, 41 CrS 4	820 ... 860 u,v		840 ± 5	–
25 CrMo 4, 25 CrMoS 4	840 ... 880 v,u	540 ... 680	860 ± 5	850 ... 890
34 CrMo 4, 34 CrMoS 4	830 ... 870 u,v		850 ± 5	–
42 CrMo 4, 42 CrMoS 4	820 ... 860 u,v		840 ± 5	–
50 CrMo 4	820 ... 860 u		850 ± 5	–
41 CrNiMo 2, 41 CrNiMoS 2	830 ... 860 u,v	540 ... 660	845 ± 5	–
36 CrNiMo 4	820 ... 850 u,v	540 ... 680	850 ± 5	–
36 CrNiMo 6	830 ... 860 u	540 ... 660	845 ± 5	–
31 CrNiMo 8	830 ... 860 u	540 ... 660	845 ± 5	–
51 CrV 4	820 ... 860 u	540 ... 680	850 ± 5	–

[1] Granica tečenja R_e odn. dogovorna granica tečenja $R_{p\,0,2}$.

[2] Navedene vrijednosti vrijede za promjer 30 mm. Kod manjih promjera su: R_m veća, A manja dok su kod većih promjera R_m manja a A veća.

[3] Kaljenje: v - u vodi, u - u ulju.

[4] Za pokus s čeonim kaljenjem je (za austenitiziranje) potrebno zagrijavanje najmanje 0,5 h.

Prokaljivost

Vrsta	Tvrdoća HRC[1] na udaljenosti od čeone plohe (mm)												
	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40
C 35 E4	57	55	49	34	28	26	25	24	23	20	–	–	–
C 35 M2	44	33	22	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C 45 E4	61	61	57	44	34	32	31	30	29	28	27	–	–
C 45 M2	53	37	28	26	24	22	21	20	–	–	–	–	–
C 55 E4	64	63	60	52	37	35	34	33	32	30	29	–	–
C 55 M2	56	47	33	31	29	27	26	25	24	22	20	–	–
C 60 E4	66	65	62	54	39	36	35	34	33	31	30	–	–
C 60 M2	58	50	35	32	30	28	27	26	25	23	21	–	–
22 Mn 6	51	48	44	37	33	30	28	26	25	23	–	–	–
	42	38	28	22	–	–	–	–	–	–	–	–	–
28 Mn 6	54	53	50	48	44	41	38	35	31	29	27	26	25
	45	42	36	27	21	–	–	–	–	–	–	–	–
36 Mn 6	59	58	57	54	49	45	41	38	35	33	31	30	30
	51	48	42	35	27	23	20	–	–	–	–	–	–
42 Mn 6	62	61	60	59	57	54	50	45	37	34	32	31	30
	55	53	49	39	33	29	27	26	23	22	20	–	–
34 Cr 4	57	57	56	54	52	49	46	44	39	37	35	34	33
34 CrS 4	49	48	45	41	35	32	29	27	23	21	20	–	–
37 Cr 4	59	59	58	57	55	52	50	48	42	39	37	36	35
37 CrS 4	51	50	48	44	39	36	33	31	26	24	22	20	–
41 Cr 4	61	61	60	59	58	56	54	52	46	42	40	38	37
41 CrS 4	53	52	50	47	41	37	34	32	29	26	23	21	–
25 CrMo 4	52	52	51	50	48	46	43	41	37	35	33	32	31
25 CrMoS 4	44	43	40	37	34	32	29	27	23	21	20	–	–
34 CrMo 4	57	57	57	56	55	54	53	52	48	45	43	41	40
34 CrMoS 4	49	49	48	45	42	39	36	34	30	28	27	26	25
42 CrMo 4	61	61	61	60	60	59	59	58	56	53	51	48	47
42 CrMoS 4	53	53	52	51	49	43	40	37	34	32	31	30	30
50 CrMo 4	65	65	64	64	63	63	63	62	61	60	58	57	55
	58	58	57	55	54	53	51	48	45	41	39	38	37
41 CrNiMo 2	60	60	60	59	58	57	55	54	48	42	40	38	37
41 CrNiMoS 2	53	53	52	50	47	42	38	35	30	28	26	25	24
36 CrNiMo 4	59	59	58	58	57	57	57	56	55	54	53	52	51
	51	50	49	49	48	47	46	45	43	41	39	38	36
36 CrNiMo 6	58	58	58	58	57	57	57	57	57	57	57	57	57
	50	50	50	50	49	48	48	48	48	47	47	47	46
31 CrNiMo 8	56	56	56	56	55	55	55	55	55	54	54	54	54
	48	48	48	48	47	47	47	46	46	45	45	44	44
51 CrV 4	65	65	64	64	63	62	62	61	60	58	57	55	54
	57	56	55	54	53	52	50	48	44	41	37	35	34

[1] Gornje i donje brojke znače granične vrijednosti tvrdoće.

Čelici za obradbu na automatima (ISO 683/9 – 1988)

Vrste i sastav

Vrsta ISO	Sastav %[1]					
	C	Si	Mn	P	S	Pb
bez toplinske obradbe						
9 S 20	< 0,13	< 0,05	0,09	< 0,11	0,20	–
11 SMn 28	< 0,14	< 0,05	1,10	< 0,11	0,28	–
11 SMnPb 28	< 0,14	< 0,05	1,10	< 0,11	0,28	0,25
12 SMn 35	< 0,15	< 0,05	1,25	< 0,11	0,35	–
12 SMnPb 35	< 0,15	< 0,05	1,25	< 0,11	0,35	0,25
za cementiranje						
10 S 20	0,10	0,28	0,90	< 0,06	0,20	–
10 SPb 20	0,10	0,28	0,90	< 0,06	0,20	0,25
17 SMn 20	0,17	0,28	1,40	< 0,06	0,20	–
za poboljšavanje						
35 S 20	0,35	0,28	0,90	< 0,06	0,20	–
35 SMn 20	0,35	0,28	1,15	< 0,06	0,20	–
44 SMn 28	0,44	0,28	1,50	< 0,06	0,28	–
46 S 20	0,46	0,28	0,90	< 0,06	0,20	–

Toplinska obradba čelika za cementiranje

Vrsta	Ugljičenje	Jednostruko kaljenje	Dvostruko kaljenje		Popuštanje
			jezgre	površine	
	$\frac{\vartheta}{°C}$	$\frac{\vartheta}{°C}$	$\frac{\vartheta}{°C}$	$\frac{\vartheta}{°C}$	$\frac{\vartheta}{°C}$
10 S 20 10 SPb 20 17 SMn 20	880 ... 980	830 ... 870	880 ... 920	780 ... 820	150 ... 200

Toplinska obradba čelika za poboljšavanje

Vrsta	Normaliziranje	Poboljšavanje	
		kaljenje	popuštanje
	$\frac{\vartheta}{°C}$	$\frac{\vartheta}{°C}$	$\frac{\vartheta}{°C}$
35 S 20 35 SMn 20	860 ... 890	860 ... 890 v,u	540 ... 680
44 SMn 28 46 S 20	840 ... 870	840 ... 870 u,v	540 ... 680

[1] Srednje vrijednosti.

Mehanička svojstva hladno vučenog čelika [1]

Vrsta	Tvrdoća HB_{max}	Granica tečenja $\frac{R_e}{N/mm^2}$	Vlačna čvrstoća $\frac{R_m}{N/mm^2}$	Istezljivost $\frac{A}{\%}$
bez toplinske obradbe				
9 S 20	159	355	440 ... 740	9
11 SMn 28 11 SMnPb 28	159	375	460 ... 760	8
12 SM n 35 12 SMnPb 35	163	390	490 ... 790	8
za cementiranje				
10 S 20 10 SPb 20	149		440 ... 740	9
17 SMn 20	170		490 ... 790	7
za poboljšavanje				
35 S 20	192		540 ... 740	8
35 SMn 20	200		580 ... 780	8
44 SMn 28	241		720 ... 920	7
46 S 20	223		640 ... 830	7

Mehanička svojstva cementiranoga čelika [1]

Vrsta	Granica tečenja $\frac{R_e}{N/mm^2}$	Vlačna čvrstoća $\frac{R_m}{N/mm^2}$	Istezljivost $\frac{A}{\%}$
10 S 20 10 SPb 20	250	400 ... 700	13
17 SSMn 20	400	600 ... 900	10

Mehanička svojstva poboljšanoga čelika [1]

Vrsta	Granica tečenja $\frac{R_e}{N/mm^2}$	Vlačna čvrstoća $\frac{R_m}{N/mm^2}$	Istezljivost $\frac{A}{\%}$
35 S 20	335	540 ... 740	16
35 SMn 20	365	590 ... 790	16
44 SMn 28	490	710 ... 910	11
46 S 20	380	610 ... 810	13

[1] Sve vrijednosti vrijede za promjer 30 mm. Za manje (veće) promjere su R_e i R_m veći (manji), a A je manja (veća).

Čelici za opruge (ISO 683/XIV – 1973)

Vrste i sastav

Vrsta ISO	Sastav % [1] C	Si	Mn	P_{max}	S_{max}	Cr	Mo	ostalo
1	0,79	0,28	0,65	0,050	0,050	–	–	–
2	0,79	0,28	0,65	0,035	0,035	–	–	–
3	0,47	1,75	0,65	0,040	0,040	–	–	–
4	0,51	1,75	0,65			–	–	–
5	0,56	1,75	0,75			–	–	–
6	0,61	1,95	0,85			–	–	–
7	0,61	1,95	0,85			0,33	–	–
8	0,56	0,28	0,85	0,035	0,035	0,75	–	–
9	0,60	0,28	0,85			0,75	–	–
10	0,60	0,28	0,85			0,75	–	>0,0005 B
11	0,46	1,50	0,65			0,63	0,23	–
12	0,60	0,28	0,85			0,80	0,30	–
13	0,52	0,28	0,85			1,05	–	0,15 V
14	0,52	0,28	0,85			1,05	0,20	0,10 V

Toplinska obradba

Vrsta	Kovanje $\frac{\vartheta}{°C}$	Obradba u vrućem stanju $\frac{\vartheta}{°C}$	Meko žarenje $\frac{\vartheta}{°C}$	Poboljšavanje: kaljenje [2] $\frac{\vartheta}{°C}$	Poboljšavanje: popuštanje $\frac{\vartheta}{°C}$
1,2	1 050 ... 850	900 ... 840	640 ... 700	820 ... 850 u	400 ... 550
3	1 050 ... 850	900 ... 840	640 ... 700	850 ... 880 v	400 ... 550
4		900 ... 820		845 ... 875 v	
5		900 ... 830		840 ... 870 u	
6, 7		920 ... 830		830 ... 860 u	
8, 9, 10	1 100 ... 850	920 ... 830	640 ... 700	830 ... 860 u	400 ... 550
11				850 ... 880 u	
12				830 ... 860 u	
13, 14				850 ... 880 u	

Mehanička svojstva

Nakon mekog žarenja čelici 1 – 14 imaju tvrdoću 241 ... 255 HB. Nakon poboljšavanja imaju vlačnu čvrstoću R_m između 1180 N/mm² (1,2) i 1370 N/mm² (3 ... 14), granicu tečenja $R_{p0,2}$ između 880 N/mm² (1,2) i 1180 N/mm² (3 ... 14); istezljivost A_{min} = 5 .. .6 %.

[1] Srednje odn. najveće (max ili >) vrijednosti.
[2] v - voda, u - ulje

Čelici za ventile (ISO 638/XV – 1976)

Vrste i sastav

Vrsta ISO	Sastav % [1]							ostalo
	C	Si	Mn	P_{max}	S_{max}	Cr	Mo	
1	0,45	3,25	< 0,80	0,040	0,030	8,5	< 0,50	–
2	0,40	2,4	< 0,80	0,040	0,030	10,5	–	1,0 Mo
3	0,85	< 1,0	< 1,5	0,040	0,030	17,5	–	2,3 Mo, 0,45 V
4	0,80	2,17	< 0,80	0,040	0,030	20,0	1,35	–
5	0,43	< 2,0	< 1,0	0,045	0,030	13,5	13,5	2,5 W
6	0,45	2,5	1,15	0,045	0,030	18,5	9,0	1,0 W
7	0,20	0,85	1,25	0,045	0,030	21,0	11,5	0,18 N
8	0,53	< 0,25	9,0	0,050	0,030	12,5	3,9	0,46 N
9	0,53	< 0,25	9,0	0,050	0,058	21,5	3,9	0,46 N
10	0,70	0,65	6,2	0,050	0,045	21,0	1,65	0,23 N
11	> 0,10	< 1,0	< 1,0	0,045	0,030	19,5	ost.	2,25 VI, < 2,0 Co [2]
12	0,12	< 1,0	1,5	0,045	0,030	21,3	20,0	20,0 Co, 3,0 Mo [3]

Toplinska obradba

Vrsta	Kaljenje $\frac{\vartheta}{°C}$	Popuštanje $\frac{\vartheta}{°C}$	Vrsta	Kaljenje $\frac{\vartheta}{°C}$	Popuštanje $\frac{\vartheta}{°C}$
1	1 020 ... 1 070 u, z	720 ... 820	7	1 100 ... 1 200 u, v	700 ... 800
2	1 020 ... 1 080 u, z	720 ... 820	8	1 100 ... 1 180 v	730 ... 800
3	1 050 ... 1 080 u	700 ... 750	9	1 100 ... 1 180 v	730 ... 800
4	1 050 ... 1 080 u, z	700 ... 800	10	1 100 ... 1 200 v	730 ... 800
5	980 ... 1 080 v, u	–	11	1 020 ... 1 100 z, v	700 ...750
6	980 ... 1 080 v	–	12	1 150 ... 1 200 z, v	780 ... 830

Mehanička svojstva

Vrsta	Granica tečenja $\frac{R_{p\,0,2}}{N/mm^2}$	Vlačna čvrstoća $\frac{R_m}{N/mm^2}$	Istezljivost $\frac{A}{\%}$	Vlačna čvrstoća R_m/(N/mm²) pri temperaturi °C					
				500	600	700	750	800	850
1	685	930	16	490	245	110	70	–	–
2	735	930	15	540	295	125	80	–	–
3	835	1 080	12	540	295	175	135	100	–
4	735	930	10	590	345	145	110	70	–
5	345	785	35	540	490	315	255	195	–
6	440	885	30	590	490	345	265	195	–
7	440	835	25	590	510	390	345	295	–
8	640	1 030	8	640	560	440	365	325	245
9	640	1 030	8	640	560	440	365	325	245
10	540	1 030	20	640	540	440	365	295	–
11	590	1 080	30	735	685	590	490	390	–
12	390	885	25	550	510	450	390	345	245

[1] Srednje odn. najveće (max ili <) vrijednosti.

[2] Tkd: < 3,0 Fe, 1,4 Al.

[3] Tkd: 0,15 N, 1,0 Nb, 2,5 W.

Nehrđajući čelici (ISO 683/13 – 1986)

Vrste i sastav

Vrsta ISO	Sastav % [1]							ostalo
	C_{max}	Mn_{max}	P_{max}	S_{max}	Cr	Ni_{max}	Mo	
Feritni čelici								
1 Ti	0,08	1,0	0,040	0,030	11,5	1,0	–	< 0,5 Ti
1	0,08	1,0	0,040	0,030	13,3	1,0	–	–
2	0,08	1,0	0,040	0,030	13,3	1,0	–	0,20 Al
8	0,08	1,0	0,040	0,030	17,0	1,0	–	–
8a	0,08	1,5	0,060	0,025	17,0	1,0	< 0,60	–
8b	0,07	1,0	0,040	0,030	17,0	1,0	–	< 0,5 Ti
9c	0,08	1,0	0,040	0,030	17,0	1,0	1,10	–
F1	0,025	1,0	0,040	0,030	18,0	0,6	2,12	< 0,025 N
Martenzitni čelici								
3	0,12	1,0	0,040	0,030	12,5	1,0	–	
4	0,21	1,0	0,040	0,030	13,0	1,0	–	
5	0,31	1,0	0,040	0,030	13,0	1,0	–	
7	0,12	1,5	0,060	0,25	13,0	1,0	< 0,60	
9a	0,14	1,5	0,060	0,25	16,5	1,0	< 0,60	
9b	0,19	1,0	0,040	0,030	16,3	2,0	–	
Austenitni čelici								
10	0,03	2,0	0,045	0,030	18,0	10,5	–	–
11	0,07	2,0	0,045	0,030	18,0	9,5	–	–
12	0,12	2,0	0,045	0,030	18,0	9,0	–	–
13	0,10	2,0	0,045	0,030	18,0	12,0	–	–
14	0,15	2,0	0,045	0,030	17,0	7,0	–	–
15	0,08	2,0	0,045	0,030	18,0	10,5	–	< 0,40 Ti
16	0,08	2,0	0,045	0,030	18,0	10,5	–	< 0,80 Nb
17	0,12	2,0	0,060	0,25	18,0	9,0	–	–
17a	0,12	2,0	0,20	0,060	18,0	9,0	–	0,15 Se
19	0,03	2,0	0,045	0,030	17,5	12,5	2,3	–
19a	0,03	2,0	0,045	0,030	17,5	13,0	2,8	–
20	0,07	2,0	0,045	0,030	17,5	12,0	2,3	–
20a	0,07	2,0	0,045	0,030	17,5	12,5	2,8	–
21	0,08	2,0	0,045	0,030	17,5	12,5	2,3	< 0,40 Ti
23	0,08	2,0	0,045	0,030	17,5	12,5	2,3	< 0,80 Nb
24	0,03	2,0	0,045	0,030	18,5	15,5	3,5	–
10 N	0,03	2,0	0,045	0,030	18,0	10,0	–	0,17 N
19 N	0,03	2,0	0,045	0,030	17,5	12,0	2,3	0,17 N
19a N	0,03	2,0	0,045	0,030	17,5	13,0	2,8	0,17 N
A-2	0,15	6,5	0,060	0,030	17,0	4,5	–	0,15 N
A-3	0,15	9,0	0,060	0,030	18,0	5,0	–	0,15 N
A-4	0,025	2,0	0,035	0,025	20,5	25,5	4,5	1,5 Cu

[1] Srednje odn. najveće (max ili <) vrijednosti.

Toplinska obradba

Vrsta	Žarenje [1] $\frac{\vartheta}{°C}$	Poboljšavanje: kaljenje [1] $\frac{\vartheta}{°C}$	Poboljšavanje: popuštanje $\frac{\vartheta}{°C}$
1 Ti	750 ... 850 z, p		
1, 2	750 ... 800 z, p		
8, 8a, 8b, 9c	750 ... 850 z, v, p		
F 1	800 ... 1 000 v, z		
3, 4, 7	700 ... 780 z	950 ... 1 000 u, z	700 ... 750
5	700 ... 780 z	950 ... 1 050 u, z	630 ... 680
9a	800 ... 850 z, p	980 ... 1 030 u, z	550 ... 650
9b	650 ... 750 z	980 ... 1 030 u, z	600 ... 700
10, 10 N, 11, 12, 13, 17, 17a, A-2, A-3	1 000 ... 1 100 v, z		
14, 15, 16, 19, 19a, 19 N, 19a N, 20, 20a, 21, 23, 24	1 020 ... 1 120 v, z		
A-4	1 050 ... 1 150 v, z		

Mehanička svojstva

Vrsta	Žareno: Tvrdoća HB_{max}	Žareno: Granica tečenja $\frac{R_{p\,0,2\,min}}{N/mm^2}$	Žareno: Vlačna čvrstoća $\frac{R_m}{N/mm^2}$	Žareno: Istezljivost $\frac{A_{min}}{\%}$	Kaljeno: Granica tečenja $\frac{R_{p\,0,2\,min}}{N/mm^2}$	Kaljeno: Vlačna čvrstoća $\frac{R_m}{N/mm^2}$	Kaljeno: Istezljivost $\frac{A_{min}}{\%}$
1 Ti	184	210	390 ... 590	25			
1, 2	197	230	400 ... 630	20			
8, 8a	197	250	430 ... 630	20			
8b	193	230	420 ... 620	20			
9c	205	280	460 ... 660	18			
F 1	217	275	420 ... 620	20			
3	200	250	470 ... 670	20	400	600 ... 800	16
4	220	-	< 740	-	450	650 ... 850	15
5	235	-	< 780	-	600	800 ... 1 000	11
7	207	-	< 700	-	440	620 ... 820	12
9a	217	-	< 730	-	450	640 ... 840	11
9b	285	-	< 950	-	680	880 ... 1 080	11

Nakon žarenja nehrđajući austenitni čelici (10 ... 24) imaju tvrdoću 192 HB, a čelici (10 N ... A-4) 212 ... 220 HB, vlačnu čvrstoću R_m između 480 N/mm² i 690 N/mm² (10 ... 24) i između 550 N/mm² i 720 N/mm² (10 N ... A-4); a istezljivost je A_{min} = 30 ... 40 %.

1) p - peć, z - zrak, u - ulje, v - voda

Nehrđajući čelici za precipitacijsko očvršćivanje (ISO 683/XVI – 1976)

Vrste i sastav

Vrsta ISO	Sastav % [1]: C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	ostali
1	< 0,07	1,0	< 1,0	16,5	4,0	-	4,0	0,30 Nb
2	< 0,09	1,0	< 1,0	17,0	7,1	-	< 0,5	1,12 Al
3	< 0,09	1,0	< 1,0	15,0	7,1	2,5	-	1,12 Al
4	< 0,07	1,0	< 1,0	14,8	4,5	-	3,5	0,35 Nb
5	0,10	0,5	0,88	16,5	4,5	2,9	-	0,10 N
6	0,12	0,5	0,88	15,5	4,5	2,9	-	0,10 N
7	< 0,08	1,0	< 1,0	16,8	6,8	-	-	0,80 Ti
8	0,05	0,6	1,3	15,5	5,4	1,6	1,8	0,10 Ti
9	< 0,07	0,6	< 1,0	14,0	5,4	1,6	1,6	0,45 Nb

Toplinska obradba i mehanička svojstva [2]

Vrsta	Žarenje $\frac{\vartheta}{°C}$	Kaljenje [3]	Tvrdoća HRC max	Starenje $\frac{\vartheta}{°C}$	Starenje h	Hlađenje [3]	Tvrdoća HRC min	Granica tečenja $\frac{R_{p\,0,2}}{N/mm^2}$	Vlačna čvrstoća [4] $\frac{R_m}{N/mm^2}$	Istezljivost $\frac{A_{min}}{\%}$
1, 4	1 040	z, v	39	480	1	z, v	40	1 170	1 465	10
				550	4	z, v	35	1 000	1 245	11
				620	4	z, v	28	720	1 125	14
2	1 065	z, u	21	955	0,2	[5]	41	1 030	1 390	6
				+ 510	1	z				
3	1 065	z, u	23	955	0,2	[5]	43	1 090	1 515	6
				+ 510	1	z				
5	1 055	z, v	25	930	0,8	[7]	37	1 030	1 285	9
				+ 540	3	z				
6	1 040	[6]	39	955	1	[7]	37	1 070	1 330	11
	+ 775	z		+ 540	3	z, v				
	+ 580	z, v								
7	1 040	z	32	510	0,5	z	39	1 180	1 460	8
				540	0,5	z	37	1 100	1 390	8
				565	0,5	z	35	1 030	1 325	9
8	1 050	z	22	750	2	z	40	980	1 275	7
				+ 450	2	z				
9	1 050	z	36	850	2	z	38	1 030	1 225	12
				+ 450	2	z				
	950	z	39	450	2	z	40	1 030	1 370	10

1) Srednje odnosno najveće (<) vrijednosti. P < 0,04 %, S < 0,03 %.
2) Podatci vrijede za valjane i kovane poluproizvode.
3) z - zrak, u - ulje, v - voda.
4) Srednje vrijednosti.
5) Brzo hlađenje do 20 °C, zatim hlađenje u 1 h do -70 °C (8 h).
6) Hlađenje u 1 h do 20 °C (0,5 h).
7) Brzo hlađenje do 20 °C, zatim hlađenje do -75 °C (3 h).

ALATNI ČELICI
(ISO 4957 – 1980, DIN 17350 – 1980)

Nelegirani alatni čelici - za rad u hladnom stanju

Vrste i sastav

Vrsta ISO	Vrsta DIN	Sastav % C	Si_{max}	Mn_{max}	P_{max}	S_{max}
–	C 45 W	0,40 ... 0,50	0,40	0,80	0,035	0,035
–	C 60 W	0,55 ... 0,65	0,40	0,80	0,035	0,035
TC 70	(C 70 W2)	0,65 ... 0,74	0,35	0,35	0,030	0,030
TC 80	(C 80 W1)	0,75 ... 0,84	0,35	0,35	0,030	0,030
–	C 85 W	0,80 ... 0,90	0,40	0,70	0,025	0,020
TC 90	–	0,85 ... 0,94	0,35	0,35	0,030	0,030
TC 105	(C 105 W1)	0,95 ... 1,09	0,35	0,35	0,030	0,030
TC 120	(C 125 W)	1,10 ... 1,29	0,35	0,35	0,030	0,030
TC 140	(C 135 W)	1,30 ... 1,50	0,35	0,35	0,030	0,030

Toplinska obradba i tvrdoća

Vrsta ISO	Vrsta DIN	Tvrdoća (meko žar.) HB_{max}	Kaljenje $\frac{\vartheta}{°C}$		Kaljenje sredstvo [1]	Popuštanje $\frac{\vartheta}{°C}$		Tvrdoća (popušteno) HRC_{min}
–	C 45 W	[2]	[2]		[2]	[2]		[2]
–	C 60 W	231	815		u	180		52
TC 70	(C 70 W2)	183	800		v	180		57
TC 80	(C 80 W1)	192	790		v	180		58
–	C 85 W	222	815		u	180		57
				± 10			± 10	
TC 90	–	207	780		v	180		60
TC 105	(C 105 W1)	212	780		v	180		61
TC 120	(C 125 W)	217	770		v	180		62
TC 140	(C 135 W)	217	770		v	180		63

[1] u - ulje, v - voda

[2] Bez toplinske obradbe; tvrdoća ≈ 190 HB.

Legirani alatni čelici

Vrste i sastav

Vrsta ISO	Sastav % [1] C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W
za rad u hladnom stanju:								
TCV 105	1,05	< 0,35	< 0,35	–	–		0,20	
60 SiMn 2	0,60	1,75	0,75	–	–	–	–	–
51 CrMnV 1	0,51	0,25	0,85	1,05	–	–	0,15	–
45 WCrV 2	0,45	0,95	0,30	1,05	–	–	0,20	2,0
50 WCrV 2	0,50	0,95	0,50	1,45	–	–	0,20	2,0
60 WCrV 2	0,60	0,95	0,30	1,05	–	–	0,20	2,0
100 Cr 2	1,00	0,25	0,30	1,50	–	–	–	–
105 WCr 1	1,05	0,25	0,85	0,95	–	–	–	1,30
90 MnV 2	0,90	0,25	1,95	–	–	–	0,20	–
95 MnCrW 1	0,95	0,25	1,20	0,50	–	–	0,15	0,55
100 CrMoV 5	1,00	0,25	0,50	5,00	1,15	–	0,35	–
160 CrMoV 12	1,60	0,25	0,30	12,00	0,85	–	0,65	–
210 Cr 12	2,10	0,25	0,30	12,00	–	–	–	–
210 CrW 12	2,10	0,25	0,30	12,00	–	–	–	0,95
5 CrMo 4	< 0,07	0,15	0,15	4,00	0,50	–	–	–
7 CrMoNi 2	< 0,10	0,25	0,35	1,95	0,20	0,50	–	–
35 CrMo 2	0,35	0,55	1,00	1,85	0,50	–	–	–
20 Cr 13	0,20	< 1,0	< 1,0	13,00	–	< 1,0	–	–
30 Cr 13	0,30	< 1,0	< 1,0	13,00	–	< 1,0	–	–
40 Cr 13	0,40	< 1,0	< 1,0	13,50	–	< 1,0	–	–
38 CrMo 15	0,38	< 1,0	< 1,0	16,00	1,25	–	–	–
110 CrMo 17	1,10	< 1,0	< 1,0	17,00	0,60	–	–	–
za rad u toplom stanju:								
40 NiCrMoV 4	0,40	0,25	0,50	1,85	0,50	3,85	0,15	–
55 NiCrMoV 2	0,55	0,25	0,80	1,10	0,40	1,75	0,15	–
35 CrMo 2	0,35	0,55	1,00	1,85	0,50	–	–	–
30 CrMoV 3	0,30	0,25	0,30	3,00	2,75	–	0,55	–
35 CrMoV 5	0,35	1,05	0,40	5,00	1,45	–	0,40	–
40 CrMoV 5	0,40	1,05	0,40	5,00	1,45	–	1,00	–
30 WCrV 5	0,30	0,25	0,30	2,50	–	–	0,55	4,80
30 WCrV 9	0,30	0,25	0,30	3,00	–	–	0,40	9,00

[1] Srednje odn. najveće (<) vrijednosti.

Toplinska obradba i tvrdoća

Vrsta ISO	Tvrdoća (meko žar.) HB$_{max}$	Kaljenje ϑ °C		Kaljenje sredstvo[1]	Popuštanje ϑ °C		Tvrdoća (popušteno) HRC$_{min}$
za rad u hladnom stanju:							
TCV 105	212	790	± 10	v	180	± 10	61
60 SiMn 2	248	855		u	180		55
51 CrMnV 1	241	865		u	180		55
45 WCrV 2	229	910		u	180		56
50 WCrV 2	229	920		u	180		57
60 WCrV 2	229	910		u	180		58
100 Cr 2	223	840		u	180		60
105 WCr 1	229	820		u	180		61
90 MnV 2	229	790		u	180		60
95 MnCrV 1	229	800		u	180		60
100 CrMoV 5	241	970		z	180		60
160 CrMoV 12	255	1 020		z	180		61
210 Cr 12	248	970		u	180		62
210 CrW 12	255	970		u	180		62
5 CrMo 4	121	2)		2)	2)		2)
7 CrMoNi 2	145	2)		2)	2)		2)
35 CrMo 2	3)	3)		3)	3)		3)
20 Cr 13	223	1 010		u	180		45
30 Cr 13	235	1 010		u	180		49
40 Cr 13	255	1 010		u	180		51
38 CrMo 15	285	1 010		u	180		46
110 CrMo 17	285	1 030		u	180		58
za rad u toplom stanju:							
40 NiCrMoV 4	277	850	± 10	u	500	± 10	40
55 NiCrMoV 2	248	850		u	500		42
35 CrMo 2	2)	2)		2)	2)		2)
30 CrMoV 3	229	1 040		u	550		46
35 CrMoV 5	229	1 020		u	550		48
40 CrMoV 5	229	1 020		u	550		48
30 WCrV 5	235	1 060		u	600		46
30 WCrV 9	241	1 150		u	600		48

[1] v - voda, u - ulje, z - zrak.
[2] Za cementiranje.
[3] Bez toplinske obradbe; tvrdoća = 300 HB.

Brzorezni čelici

Vrste i sastav

Vrsta ISO	Sastav %[1] C	Co	Cr	Mo	V	W
HS 18-0-1	0,78	-	4,00	-	1,05	17,95
HS 2-9-2	1,00	-	4,00	8,70	1,95	1,80
HS 1-8-1	0,82	-	4,00	8,50	1,15	1,70
HS 6-5-2	0,87	-	4,00	4,95	1,95	6,20
HS 6-5-3	1,23		4,00	4,95	2,95	6,20
HS 18-0-1-10	0,80	10,00	4,00	-	1,55	17,95
HS 18-1-1-5	0,80	4,95	4,00	0,85	1,35	17,95
HS 6-5-2-5	0,90	4,95	4,00	4,95	1,95	6,20
HS 12-1-5-5	1,53	4,95	4,00	0,85	5,15	12,25
HS 10-4-3-10	1,28	10,00	4,00	3,55	3,25	9,50
HS 2-9-1-8	1,13	8,00	4,00	9,50	1,15	1,60
HS 7-4-2-5	1,13	4,95	4,00	3,85	1,95	6,90

Toplinska obradba i tvrdoća

Vrsta	Tvrdoća (meko žar.) HB$_{max}$	Kaljenje ϑ °C		Kaljenje sredstvo[2]	Popuštanje ϑ °C		Tvrdoća (popušteno) HRC$_{min}$
HS 18-0-1	269	1 260	± 10	u	560	± 10	63
HS 2-9-2	255	1 200		u	560		64
HS 1-8-1	255	1 210		u	560		63
HS 6-5-2	255	1 220		u	560		64
HS 6-5-3	269	1 210		u	560		65
HS 18-0-1-10	293	1 280		u	560		64
HS 18-1-1-5	277	1 270		u	560		64
HS 6-5-2-5	269	1 230		u	560		64
HS 12-1-5-5	293	1 240		u	560		65
HS 10-4-3- 10	293	1 230		u	560		66
HS 2-9-1-8	277	1 190		u	530		66
HS 7-4-2-5	277	1 200		u	540		66

[1] Srednje vrijednosti. - Si < 0,50 %, Mn < 0,40 %, P < 0,030 %, S < 0,030 %.
[2] u - ulje.

ČELIČNI LIJEV

Čelični lijev je svaki čelik proizveden odnosno rastaljen u talioničkoj ili električnoj peći i ulijeven u kalupe.

Čelični lijev otporan povišenim temperaturama (DIN 17 245 – 1987)

Vrste i sastav

Vrsta	W. Nr. [1]	Sastav % C	Si	Mn	P_{max}	S_{max}	Cr	Mo	Ni	V
Gs-C 25	1.0619	0,20	0,45	0,65	0,020	0,015	< 0,30	–	–	–
GS-C 22 Mo 4	1.5419	0,20	0,45	0,65	0,020	0,015	< 0,30	0,40	–	–
GS-17 CrMo 5 5	1.7359	0,18	0,45	0,65	0,020	0,015	1,25	0,50	–	–
GS-18 CrMo 9 10	1.7379	0,18	0,45	0,65	0,020	0,015	2,25	1,00	–	–
GS-17 CrMoV 5 11	1.7706	0,18	0,45	0,65	0,020	0,015	1,35	1,00	–	0,25
G-X 8 CrNi 12	1.4107	0,08	0,25	0,65	0,030	0,020	12,00	< 0,50	1,15	–
G-X 11 CrMoV 12 1	1.4931	0,23	0,25	0,65	0,030	0,020	11,75	< 1,10	0,85	0,30

Mehanička svojstva

Vrsta	Vlačna čvrstoća $R_{m\ med}$ N/mm²	Istezljivost $A_{5\ min}$ %	Udarna radnja loma KV_{min} J	Granica tečenja pri temperaturi °C $R_{p0,2}$/ (N/mm²) 20	200	300	400	500
GS-Cr 5	515	22	27	245	175	145	130	–
GS-22 Mo 4	515	22	27	245	190	165	150	135
GS-17 CrMo 5 5	565	20	27	315	255	230	205	180
GS-18 CrMo 9 10	665	18	40	400	355	345	315	280
GS-17 CrMoV 5 11	685	15	27	440	385	365	335	300
G-X 8 CrNi 12	615	18	35	355	275	265	255	–
G-X 22 CrMoV 12 1	815	15	21	540	450	430	390	340

Toplinska obradba

Vrsta	Meko žarenje ϑ °C	Kaljenje ϑ °C	Popuštanje ϑ °C
GS-C 25	580	920 ... 960	600 ... 700
GS-22 Mo 4	660	920 ... 960	680 ... 730
GS-17 CrMo 5 5	660	920 ... 960	680 ... 730
GS-18 CrMo 9 10	660	930 ... 980	680 ... 740
GS-17 CrMoV 5 11	660	920 ... 960	700 ... 740
G-X 8 CrNi 12	660	1 000 ... 1 060	680 ... 730
G-X 22 CrMoV 12 1	680	1 030 ... 1 080	700 ... 750

[1] Werkstoff-Nummer

Granica puzanja $R_{p1/t}$ i statička izdržljivost $R_{m/t}$

Vrsta	R_{p1}, R_m N/mm²	Temperatura ϑ/°C 400	425	450	475	500	525	550	575	600
GS-C 25	$R_{p1/10000}$	147	116	88	62	43	–	–	–	–
	$R_{p1/100000}$	117	80	50	28	20	–	–	–	–
	$R_{m/10000}$	225	183	145	111	84	–	–	–	–
	$R_{m/100000}$	177	130	90	64	50	–	–	–	–
	$R_{m/200000}$	(163)	(114)	(74)	(52)	(41)	–	–	–	–
GS-22 Mo4	$R_{p1/10000}$	–	–	185	166	125	76	41	–	–
	$R_{p1/100000}$	–	–	150	105	65	35	15	–	–
	$R_{m/10000}$	(300)	(321)	275	216	160	100	66	–	–
	$R_{m/100000}$	(310)	(262)	205	144	85	48	30	–	–
	$R_{m/200000}$	(290)	(240)	(180)	(120)	(70)	(36)	(23)	–	–
GS-17 CrMo 55	$R_{p1/10000}$	–	–	196	162	130	97	65	–	–
	$R_{p1/100000}$	–	–	145	110	81	55	35	–	–
	$R_{m/10000}$	–	–	321	252	187	136	98	–	–
	$R_{m/100000}$	–	–	244	173	117	76	55	–	–
	$R_{m/200000}$	–	–	222	150	96	61	44	–	–
GS-18 CrMo 9 10	$R_{p1/10000}$	350	283	229	183	141	104	70	49	36
	$R_{p1/100000}$	300	217	168	128	96	65	40	25	18
	$R_{m/10000}$	404	336	282	233	188	144	106	77	58
	$R_{m/100000}$	324	264	218	175	136	99	66	42	28
	$R_{m/200000}$	(304)	(246)	(200)	(158)	(120)	(83)	(52)	(31)	(22)
GS-17 CrMoV 5 11	$R_{p1/10000}$	438	370	305	243	188	147	112	83	61
	$R_{p1/100000}$	379	308	240	179	128	91	61	39	19
	$R_{m/10000}$	479	409	342	278	222	179	144	113	86
	$R_{m/100000}$	419	346	275	213	150	122	88	58	30
	$R_{m/200000}$	(359)	(321)	(253)	(191)	(141)	(103)	(71)	(41)	(14)

Nehrđajući čelični lijev (DIN 17445 – 1984)

Vrste i sastav

Vrsta DIN	W.Nr.	Sastav % C med	Si max	Mn max	P max	S max	Cr med	Mo	Ni	drugo
Feritni (martenzitni) lijev										
G-X CrNi 13	1.4008	0,09	1,0	1,0	0,045	0,030	12,8	< 0,50	1,5	–
G-X 20 Cr 14	1.4027	0,20	1,0	1,0	0,045	0,030	13,5	–	< 1,0	–
G-X 22 CrNi 17	1.4059	0,24	1,0	1,0	0,045	0,030	17,0	–	1,5	–
G-X 5 CrNi 13 4	1.4313	< 0,07	1,0	1,5	0,035	0,025	12,8	< 0,70	4,2	–
Austenitni lijev										
G-X6 CrNi 18 9	1.4308	< 0,07	2,0	1,5	0,045	0,030	19,0	–	10,0	–
G-X5 CrNiNb 18 9	1.4552	< 0,06	1,5	1,5	0,045	0,030	19,0	–	10,0	> 0,48 Nb [1]
G-X 6 CrNiMo 18 10	1.4408	< 0,07	1,5	1,5	0,045	0,030	19,0	2,5	11,0	–
G-X5 CrNiMoNb 18 10	1.4581	> 0,06	1,5	1,5	0,045	0,030	19,0	2,2	11,5	> 0,48 Nb [1]
G-X3 CrNiMoN 17 13 5	1.4439	< 0,04	1,0	1,5	0,045	0,030	17,5	4,2	13,5	0,17 N

[1] Nb < 8 X % C

Mehanička svojstva

Vrsta	Toplinska obradba	Tvrdoća HB	$R_{p\,0,2,\,min}$ / N/mm²	$R_{p\,1,\,min}$ / N/mm	R_m / N/mm²	A_{min} / %	KV_{min} / J
G-X8 CrNi 13	poboljšano	170 ... 240	440	-	590 ... 790	15	27
G-X 20 Cr 14	poboljšano	170 ... 240	440	-	590 ... 790	12	-
G-X 22 CrNi 17	poboljšano	230 ... 300	590	-	780 ... 980	4	-
G-X 5 CrNi 13 4	poboljšano a)	240 ... 300	550	-	760 ... 960	15	50
	poboljšano b)	280 ... 350	830	-	900 ... 1 100	12	35
G-X 6 CrNi 18 9	kaljeno	130 ... 200	175	200	440 ... 640	20	60
G-X 5 CrNiNb 18 9			175	200	440 ... 640	20	35
G-X 6 CrNiMo 18 10			185	210	440 ... 640	20	60
G- X 5 CrNiMoNb 18 10			185	210	440 ... 640	20	35
G-X 3 CrNiMoN 17 13 5			210	230	490 ... 690	20	50

Granica tečenja na povišenim temperaturama

Vrsta	$R_{p\,0,2}$/(N/mm²)					R_{p1}/(N/mm²)				
	100	200	300	400	500	100	200	300	400	500
G-X 8 CrNi 13	365	345	325	305	-	-	-	-	-	-
G-X 20 Cr 14	365	345	325	305	-	-	-	-	-	-
G-X 22 CrNi 17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G-X 5 CrNi 13 4 a	815	485	455	-	-	-	-	-	-	-
b	810	750	700	-	-	-	-	-	-	-
G-X 6 CrNi 18 9	145	115	100	-	-	170	140	125	-	-
G-X 5 CrNiNb 18 9	150	130	120	110	100	175	155	145	130	110
G-X 6 CrNiMo 18 10	150	120	100	-	-	175	145	125	-	-
G-X 5 CrNiMoNb 18 10	165	140	130	120	110	190	165	155	140	120
G-X 3 CrNiMoN 17 13 5	165	140	120	110	-	192	162	143	125	-

Toplinska obradba

Vrsta	Žarenje [1] $\frac{\vartheta}{°C}$	Kaljenje [1] $\frac{\vartheta}{°C}$	Popuštanje $\frac{\vartheta}{°C}$
G-X8 CrNi 13	700 ... 750 p	1 000 ... 1 050 z	650 ... 720
G-X20 Cr 14	750 ... 800 p	1 000 ... 1 050 z	650 ... 750
G-X22 CrNi 17	700 ... 750 p	1 000 ... 1 050 z	600 ... 700
G-X5 CrNi 13 4 a	-	1 000 ... 1 050 z	580 ... 620
b	-		500 ... 540
G-X6 Crni 18 9	-	1 050 ... 1 100 v, z	-
G-X5 CrNiNb 18 9	-	1 050 ... 1 100 v, z	-
G-X6 CrNiMo 18 10	-	1 050 ... 1 100 v, z	-
G-X5 CrNiMoNb 18 10	-	1 050 ... 1 100 v, z	-
G-X3 CrNiMoN 17 13 5	-	1 130 ... 1 180 v	-

[1] Hlađenje: p - u peći, z - na zraku, v - u vodi

Oznake lijevova i čelika prema normama ISO [1], DIN [1], W. Nr. [1], Željezarna Ravne, HRN

ISO	DIN	W. Nr.	HRN
Sivi lijev (str. 398)			
(ISO 185 - 1988)	(DIN 1691 - 1985)		(HRN C.J2.020 - 1987)
100	GG-10	0.6010	SL 100
150	GG-15	0.6015	SL 150
200	GG-20	0.6020	SL 200
250	GG-25	0.6025	SL 250
300	GG-30	0.6030	SL 300
350	GG- 35	0.6035	SL 350
Nodularni lijev (str. 399)			
(ISO 1083 - 1987)	(DIN 1693 - 1973)		(HRN C.J2.022 - 1987)
350-22	GGG-35,3	0.7033	NL 370-17
400-18	GGG-40,3	0.7043	
400-15	GGG-40	0.7040	NL 400-12
450-10	-	-	
500-7	GGG-50	0.7050	NL 500-7
600-3	GGG-60	0.7060	NL600-3
700-2	GGG-70	0.7070	NL-700-2
800-2	GGG-80	0.7080	NL 800-2
900-2	-	-	-
Austenitni sivi lijev (str. 400)			
(ISO 2892 - 1973)	(DIN 1694 - 1981)		(HRN C.J2.024 - 1989)
L-NiMn 13 7	GGL-NiMn 13 7	0.6652	L-NiMn 13 7
L-NiCuCr 15 6 2	GGL-NiCuCr 15 6 2	0.6655	L-NiCuCr 15 6 2
L-NiCuCr 15 6 3	GGL-NiCuCr 15 6 3	0.6656	L-NiCuCr 15 6 3
L-NiCr 20 2	GGL-NiCr 20 2	0.6660	L-NiCr 20 2
L-NiCr 20 3	GGL- NiCr 20 3	0.6661	L-NiCr 20 3
L-NiSiCr 20 5 3	GGL-NiSiCr 20 5 3	0.6667	L-NiSiCr 20 5 3
L-NiCr 30 3	GGL-NiCr 30 3	0.6676	L-NiCr 30 3
L-NiSiCr 30 5 5	GGL-NiSiCr 30 5 5	0.6680	L-NiSiCr 30 5 5
L-Ni 35	-	-	L-Ni 35
S-NiMn 13 7	GGG-NiMn 13 7	0.7652	N-NiMn 13 7
S-NiCr 20 2	GGG-NiCr 20 2	0.7660	N-NiCr 20 2
-	GGG-NiCrNb 20 2	0.7659	-
S-NiCr 20 3	GGG- NiCr 20 3	0.7661	N-NiCr 20 3
S-NiSiCr 20 5 2	GGG-NiSiCr 20 5 2	0.7665	N- NiSiCr 20 5 2
S-Ni 22	GGG-Ni 22	0.7670	N-Ni 22
S-NiMn 23 4	GGG-NiMn 23 4	0.7673	N-niMn 23 4
S-NiCr 30 1	GGG-NiCr 30 1	0.7677	N-NiCr 30 1
SONiCr 30 3	GGG-NiCr 30 3	0.7676	N-NiCr 30 3

[1] ISO 4957 - 1980; DIN 17350 - 1980, SEL - Stahl-Eisen-Liste (6. Auflage 1977), SEW - Stahl-Eisen-Werkstoffblatt; W. Nr. - Werkstoff-Nummer

ISO	DIN	W. Nr.	HRN
-	GGG-NiSiCr 30 5 2	0.7679	-
S-NiSiCr 30 5 5	GGG-NiSiCr 30 5 5	0.7680	N-NiSiCr 30 5 5
S-Ni 35	GGG-Ni 35	0.7683	N-Ni 35
S-NiCr 35 3	GGG-NiCr 35 3	0.7685	N-NiCr 35 3
-	GGG-NiSiCr 35 5 2	0.7688	-

Legirani sivi lijev (str. 402)

	(DIN 1695 – 1981)		(C.J2.025 – 1989)
-	G-X300 NiMo 3 Mg	0.9610	LG 300 NiMo 3 Mg
-	G-X260 NiCr 4 2	0.9620	LG 260 NiCr 4 2
-	G-X330 NiCr 4 2	0.9625	LG 330 NiCr 4 2
-	G-X300 CrNiSi 9 5 2	0.9630	LG 300 CrNiSi 9 5 2
-	G-X300 CrMo 15 3	0.9635	LG 300 CrMo 15 3
-	G- X300 CrMoNi 15 2 1	0.9640	LG 300 CrMoNi 15 2 1
-	G-X260 CrMoNi 20 2 1	0.9645	LG 260 CrMoNi 20 2 1
-	G-X260 Cr 27	0.9650	LG 260 Cr 27
-	G-X300 CrMo 27 1	0.9655	LG 300 CrMo 27 1

Temperirani lijev (str. 403)

(ISO 5922 – 1981)	(DIN 1692 – 1982)		(HRN C.J2.021 – 1987)
W 35-04	GTW-35-04	0.8035	BTEL 35-04
W 38-12	GTW-S 38-12	0.8038	BTEL 38-12
W 40-05	GTW-40-05	0.8040	BTEL 40-05
W 45-07	GTW-45-07	0.8045	BTEL 45-07
B 30-06	-	-	CTEL 30-06
B 35-10	GTS-35-10	0.8135	CTEL 35-10
P 45-06	GTS-45-06	0.8145	PTEL 45-06
P 55-04	GTS-55-04	0.8155	PTEL 55-04
P 65-02	GTS-65-02	0.8165	PTEL 65-02
P 70-02	GTS-70-02	0.8170	PTEL 70-02

Opći konstrukcijski čelici (str. 407)

(ISO 630 – 1980)	(DIN 17 100 – 1980)		(HRN C.B0.500 – 1989)
Fe 310	St 33	1.0035	Č 0130
Fe 350 A	-	-	-
Fe 360 B	St 37-2	1.0037	Č 0370
	USt 37- 2	1.0036	Č 0371
	RSt 37-2	1.0038	Č 0361

ISO	DIN	W. Nr.	Železarna Ravne	HRN
Fe 360 C	St 37-3 U	1.0116	-	Č 0362
Fe 300 D	St 37-3 N	1.0116	-	Č0363
Fe 430 A	-	-	-	-
Fe 430 B	St 44-2	1.0044	-	Č 0451
Fe 430 C	St 44-3 U	1.0144	-	Č 0452
Fe 430 D	St 44-3 N	1.0144	-	Č 0453
Fe 510 B	-	-	-	Č 0561
Fe 510 C	St 52-3 U	1.0570	-	Č 0562
Fe 510 D	St 52-3 N	1.0570	-	Č 0563
(ISO 1052-1982)				
Fe 490- 2	St 50-2	1.0050	-	Č 0545
Fe 590-2	St 60-2	1.0060	-	Č 0645
Fe 690-2	St 70-2	1.0070	-	Č 0745

Čelici za cementiranje (str. 415)

C 15 E 4	Ck 15	1.1141	-	Č 1221
C 15 M 2	Cm 15	-	-	Č 1281
20 Cr 4	20 Cr 4	-	-	Č 41201
20 CrS 4	20 CrS 4	-	-	Č 41202
16 MnCr 5	16 MnCr 5	1.7131	15 MnCr 5	Č 4320
16 MnCrS 5	16 MnCrS 5	1.7139	16 MnCrS 5	Č 4381
20 MnCr 5	20 MnCr 5	1.7147	20 MnCr 5	Č 4321
20 MnCrS 5	20 MnCrS 5	1.7149	20 MnCrS 5	Č 4382
18 CrMo 4	-	-	-	-
18 CrMoS 4	-	-	-	-
15 NiCr 13	-	-	-	-
17 NiCrMo 6	-	-	-	-
18 CrNiMo 7	17 CrNiMo 6	1.6587	-	Č 4520

Čelici za poboljšavanje (str. 417)

C 25	C 25	1.0406	-	Č 13312
C 25 E 4	Ck 25	1.1158	-	Č 1332
C 35	C 35	1.0501	C 35	Č 1430
C 35 E 4	Ck 35	1.2281	Ck 35	Č 1431
C 45	C 45	1.0503	C 45	Č 1530
C 45 E 4	Ck 45	1.1191	Ck 45	Č 1531
C 45 M 2	Cm 45	1.1201	Cm 45	Č 1580
C 55	C 55	1.0535	C 55	Č 1630
C 55 E 4	Ck 55	1.1203	Ck 55	Č 1631
C 55 M 2	Cm 55	1.1209	Cm 55	Č 1680
C 60	C 60	1.0601	C 60	Č 1730
C 60 E 4	Ck 60	1.1221	Ck 60	Č 1731
C 60 M 2	Cm 60	1.1223	Cm 60	Č 1780

Oznake lijevova i čelika prema normama ISO, DIN, W. Nr., Železarna Ravne, HRN *(nastavak)*

ISO	DIN	W. Nr.	Železarna Ravne	HRN
22 Mn 6	–	–	–	–
28 Mn 6	28 Mn 6	1.1170	28 Mn 6	Č 3135
36 Mn 6	–	–	–	–
42 Mn 6	–	–	–	–
34 Cr 4	34 Cr 4	1.7033	VC 130	Č 4130
34 CrS 4	34 CrS 4	1.7037	34 CrS 4	Č 4180
37 Cr 4	37 Cr 4	1.7034	37 Cr 4	Č 4134
37 CrS 4	37 CrS 4	1.7038	37 CrS 4	Č 4184
41 Cr 4	41 Cr 4	1.7035	VC 140	Č 4131
41 CrS 4	41 CrS 4	1.7039	41 CrS 4	Č 4181
25 CrMo 4	25 CrMo 4	1.7218	VCMo 125	Č 4730
25 CrMoS 4	25 CrMoS 4	–		Č 47301
34 CrMo 4	34 CrMo 4	1.7220	VCMo 135	Č 4731
34 CrMoS 4	34 Cr MoS 4	1.7226	34 CrMoS 4	Č 4783
42 CrMo 4	42 CrMo 4	1.7225	VCMo 140	Č 4732
42 CrMoS 4	42 CrMoS 4	1.7227	42 CrMoS 4	Č 4782
50 CrMo 4	50 CrMo 4	1.7228	VCMo 150	Č 4733
41 CrNiMo 2	–	–	–	–
41 DrniMoS 2	–	–	–	–
36 CrNiMo 4	36 CrNiMo 4	1.6511	VCNMo 100	Č 5430
36 CrNiMo 6	–	–	–	–
31 CrNiMo 8	–	–	–	–
51 CrV 4	–	–	–	–
Nelegirani alatni čelik (str. 419)				
–	C 45 W	1.1730	–	–
–	C 60 W	1.1740	–	–
TC 70	C 70 W2	1.1620	OC 70	Č 1740
TC 80	C 80 W1	1.2525	OC 80	Č 1840
–	C 85 W	1.1830	–	–
TC 90	–	–	–	–
TC 105	C 105 W1	1.2545	OC 100	Č 1940
TC 120	(SEL) C 125 W	1.1663	OC 120	Č 1943
TC 140	(SEL) C 135 W	1.1673	OCP 135	Č 1948
Legirani alatni čelik – za rad u hladnom stanju (str. 429)				
TCV 105	(SEL) 100 V 1	1.2833	OC 100 EX OC 100 ES	Č 1941 Č 1942
60 SiMn 2	(SEL) 70 Si 70	1.2823	–	–
51 CrMnV 1	51 CrV 4	1.2241	–	–

Oznake lijevova i čelika prema normama ISO, DIN, W. Nr., Železarna Ravne, HRN *(nastavak)*

ISO	DIN	W. Nr.	Železarna Ravne	HRN
45 WCrV 2	(SEW) 45 WCrV 7	1.2542	OSIKRO 2	Č 6443
50 WCrV 2	–	–	–	–
60 WCrV 2	60 WCrV 7	1.2550	OSIKRO 4	Č 6444
100 Cr 2	100 Cr 6	1.2067	OCR 4 EX	Č 4145
105 WCr 1	105 WCr 6	1.2419	MERILO EX	Č 6440
90 MnV 2	90 MnCrV 8	1.2842	MERILO	Č 3840
95 MnCrW 1	(SEL) 100 MnCrW 4	1.2510	–	–
100 CrMoV 5	(SEL) X100 CrMOV 5 1	1.2363	–	–
160 CrMoV 12	X155 CrMoV 12 1 X165 CrMoV 12	1. 2379 1.26,01	OCR 12 VM OCR 12 EX	Č 4850 Č 4750
210 Cr 12	X210 Cr 12	1.2080	OCR 12	Č 4150
210 Cr W 12	X210 CrW 12	1.2436	OCR 12 SP	Č 4650
5 CrMo 4	(SEL) X6 CrMo 4	1.2341	–	–
7 CrMoNi 2	–	–	–	–
35 CrMo 2	–	–	–	–
20 Cr 13	(SEL) X20 Cr 13	1.2082	–	–
30 Cr 13		–	–	–
40 Cr 13	(SEL) X42 Cr 13	1.2083	–	–
38 CrMo 15	X36 CrMo 17	1.2316	–	–
110 CrMo 17	–	–	–	–
Legirani alatni čelik – za rad u toplom stanju (str. 429)				
40 NiCrMoV 4	(SEL) 35 NIcrMo 16 X45 NiCrMo 4	1.2766 1.2767	– –	– –
55 NiCrMoV 2	55 NiCrMoV 6 56 NiCrMoV 7	1.2713 1.2714	UTOP EX 1 UTOP EX 2	Č 5741 Č 5742
35 CrMo 2	–	–	–	–
30 CrMoV 3	X32 CrMoV 3 3	1.2365	UTOP 33	Č 7450
35 CrMoV 5	X 38 CrMoV 5 1	1.2343	UTOP Mo 1	Č 4751
40 CrMoV 5	X40 CrMoV 5 1	1.2344	UTOPMo 2	Č 4753
30 WCrV 5	(SEW) X30 WCrV 5 3	1.2567	–	–
30 WCr V 9	(SEL) X30 WCrV 9 3	1.2581	UTOP 2	Č 6451

ISO	DIN	W. Nr.	Železarna Ravne	HRN
Brzorezni čelici (str. 431)				
HS 18-0-1	(SEL) S 18-0-1	1.3355	BRW	Č 6880
HS 2-9-2	S 2-9- 2	1.3348	BR 885	-
HS 1-8-1	(SEL) S 2-9-1	1.3346	BRM 1	Č 7880
HS 6-5-2	S 6-5-2	1.3343	BRM 2	Č 7680
HS 6-5- 3	S 6-5-3	1.3344	-	-
HS 18-0-1-10	(SEL) S 18-1-2-10	1.3265	BRC 3	Č 9682
HS 18-1-1-5	S 18- 1-2-5	1.3255	BRC	Č 6980
HS 6-5-2-5	S 6-5-2-5	1.3243	BRC Mo	Č 9780
HS 12-1-5-5	(SEW) S 12-1-4-5	1.3202	-	-
HS 10-4-3-10	S 10-4-3-10	1.3207	BRU	Č 9683
HS 2-9-1-8	S 2-10-1-8	1.3247	-	-
HS 7-4-2-5	S 7-4-2-5	1.3246	-	-
Čelični lijev otporan prema povišenim temperaturama (str. 432)				
(ISO/DP 4991)	(DIN 17245 – 1987)			(C.J3.011 - 1973)
C 23-45 A	GS-C 25	1.0619	LGC 25	ČL 1330
C 28 H	GS-22 Mo 4	1.5419	LGŽ 45 Mo	ČL 7130
C 32 H	GS-17 CrMo 55	1.7357	LP 679	ČL 7431
C 34 BH	GS-18 CrMo 9 10	1.7379	-	-
C 35 H	GS-17 CrMoV 5 11	1.7706	-	-
C 39 C Ni H	G-X 8 CrNi 12	1.4107	-	-
C 40 H	G-X 22 CrMoV 12 1	1.4931	-	-
	(DIN 17445 – 1984)			
-	G-X 8 CrNi 13	1.4008	-	-
-	G-X 20 Cr 14	1.4027	PK 2L	ČL 4171
-	G-X 5 CrNiNb 18 9	1.4552	PK 11 SPL	ČL 4572
-	G-X 5 CrNiMoNb 18 10	1.4581	PK 12 SPL	ČL 4574

TVRDE KOVINE

Sinterirane tvrde kovine

Razvijene su u Njemačkoj (Krupp, 1926.) s nazivom Widia[1] i značajno su utjecali na razvoj tehnika obradbe. Sastoje se od kovinskih karbida kao nosioca tvrdoće (Wc, TiC i TaC, kao i NbC) te Co, također i Ni i/ili Mo kao veziva. Tvrdoća im dostiže vrijednosti 1 300... 1 800 HV, čak i pri temperaturi 1 000 °C snizi se za samo 10 %. Sinterirane tvrde kovine s TiC još pri 700 °C tvrđe su od brzoreznog čelika pri sobnoj temperaturi. Također i žilavost im je zamjetna (savojna čvrstoća je 800 ... 2 200 N/mm^2). Tlačna čvrstoća je veoma visoka: 4 000 ... 5 900 N/mm^2).

Utjecaji komponenti tvrdih kovina:
- volframov karbid povisuje otpornost prema trošenju; pri višim temperaturama postoji veća sklonost pojavi difuzije;
- titanov karbid manje naginje pojavi difuzije; visoka je otpornost prema trošenju tvrde kovine u toplom stanju; povišenjem udjela TiC smanjuje se trošenje, vezivna i rubna čvrstoća kao i žilavost;
- tantalov karbid pospješuje pojavu sitnog zrna i poboljšava rubnu čvrstoću i žilavost;
- kobalt značajno utječe na žilavost.

Tvrde kovine za izradbu alata za oblikovanje (ISO/TC – 29/726 – 1963)

Oznaka	Uporaba
G 05	Visoka otpornost prema trošenju, niža žilavost; za matrice, mjerila.
G 10	Otpornost prema trošenju; za matrice, vodilice.
G 20	Otpornost prema trošenju i zadovoljavajuća žilavost; za matrice za izvlačenje cijevi, profilirane matrice, matrice za duboko izvlačenje.
G 30	Visoka statička i značajna dinamička naprezanja; matrice za izvlačenje šipki, matrice za rezanje.
G 40	Povećano dinamičko opterećenje; za rezanje, kovanje, izvlačenje profila.
G 50	Visoka dinamička opterećenja; alati za kovanje.
G 60	Veoma visoka dinamička opterećenja; alati za kovanje.

[1] njem. Wie Diamant (kao dijamant).

Tvrde kovine za rezne alate (ISO/TC – 29/726 – 1963)

Oznaka	Obrađivani materijal		Preporučena uporaba	Smjer povećanja vrijednosti
P01	Rezanje željeznih kovina, duga strugotina	Čelik, čelični lijev.	Fino tokarenje i bušenje velikim brzinama rezanja; postižu se visoke točnosti dimenzija i kvalitete površine; obradba na strojevima bez vibracija.	↑ (brzina rezanja) (posmak)
P10		Čelik, čelični lijev.	Tokarenje, kopirno tokarenje, narezivanje navoja i glodanje velikim brzinama rezanja; mali i srednje veliki presjeci strugotine.	
P20		Čelik, čelični lijev, temperirani lijev, mortenzitni čelici.	Tokarenje, kopirno tokarenje i glodanje prosječnim brzinama rezanja; srednje veliki presjeci strugotine; posebno primjereno za narezivanje navoja.	
P30		Čelik, čelični lijev, temperirani lijev, mortenzitni čelici, uran.	Tokarenje, glodanje, blanjanje s prosječnim brzinama rezanja; srednji i veliki presjeci strugotine; obradba u teškim radnim uvjetima [1].	
P40		Čelik, čelični lijev s lunkerima, austenitni nehrđajući čelici, nehrđajući čelični lijev.	Tokarenje, glodanje i blanjanje malim brzinama rezanja i velikim posmakom; obradba u teškim radnim uvjetima [1].	
P50		Čelik, čelični lijev srednje i manje čvrstoće s lunkerima i kovinskim uključcima.	Tokarenje, blanjanje, obradba na automatima s malim brzinama rezanja i velikim presjecima strugotine; zahtjevi za izvrsnu žilavost tvrde kovine; obradba alatima s velikim kutem rezanja i u teškim uvjetima obradbe [1].	
M10	Rezanje željeznih i neželjeznih kovina	Čelik, čelični lijev, tvrdi manganski čeli, sivi lijev, legirani sivi lijev.	Tokarenje prosječnim i velikim brzinama rezanja pri malim i srednje velikim presjecima strugotine.	
M20		Čelik, čelični lijev, austenitni čelik, tvrdi manganski čelik, sivi lijev.	Tokarenje i glodanje prosječnim brzinama rezanja pri srednje velikim presjecima strugotine.	
M30		Čelici, čelični lijev, austenitni čelici, vatrootporni čelici (na bazi nikla i titana ili kobalta).	Tokarenje, glodanje i blanjanje prosječnim brzinama rezanja; srednje veliki i veliki presjeci strugotine.	
M40		Čelici manje čvrstoće, meki čelici za automate neželjezni metali.	Tokarenje, zarezivanje, urezivanje, posebno na automatima.	
K01	Odrezivanje željeznih legura kratka strugotina, odrezivanje neželjeznih metala i nemetala	Sivi lijev visoke tvrdoće, tvrdi lijev tvrdoće iznad 85 Sh, Al slitine s visokim udjelom Si, kaljeni čelici, duromeri [2] s abrazivnim punilima, keramika, tvrdi papir.	Srednje fino i fino tokarenje, fino bušenje, fino glodanje.	Otpornost prema trošenju ↑ Žilavost ↓
K10		Sivi lijev tvrdoće iznad 220 HB, temperirani lijev, silumin i bakarne legure, polimeri, tvrda guma, tvrdi papir, porculan, staklo, kamen.	Tokarenje, glodanje, bušenje, razvrtavanje, upuštanje.	
K20		Sivi lijev tvrdoće iznad 220 HB, bakar, slitine bakra s cinkom, aluminij, posebne neželjezne kovine.	Srednje fino i fino tokarenje, glodanje, blanjanje, razvrtavanje i upuštanje; zahtjevi za izvanrednu žilavost tvrde kovine; (uobičajena vrsta tvrde kovine za obradbu drveta).	
K30		Sivi lijev niže tvrdoće, čelik niže čvrstoće, prešano drvo.	Tokarenje, glodanje, blanjanje; obradba alatom s velikim kutem rezanja i u teškim uvjetima obradbe [1].	
K40		Tvrdo ili meko drvo, neželjezne kovine.		

[1] Slabi uvjeti obradbe; nehomogena obrađivana tvar, za obradbu neprimjeren oblik obratka, uljevci ili srh od kovanja s tvrdim površinskim slojem, promjenjiva tvrdoća obrađivane tvari, promjenjiva dubina rezanja, isprekidano rezanje, obradba pri vibracijama alata i sl.

[2] Polimerne tvari.

tvrđe → ← žilavije						tvrđe → ← žilavije					tvrđe → ← žilavije				
P 01	P 10	P 20	P 30	P 40	P 50	M 01	M 10	M 20	M 30	M 40	K 01	K 10	K 20	K 30	K 40

Keramika [1]

Kod rezne keramike razlikujemo:

- oksidnu (bijelu) keramiku (99,7 % Al_2O_3) s niskim udjelom MgO ili SiO_2; također i ZrO_2;
- miješanu (crnu) keramiku od Al_2O_3 različitih drugih karbida i nitrida (TiC, TiN, WC);
- neoksidnu keramiku na temelju Si_3N_4.

Savojna čvrstoća rezne keramike je 300 ... 7 000 N/mm², tlačna čvrstoća 2 500 ... 4 500 N/mm², a tvrdoća 1400 ... 2400 HV 30.

Cermeti [2]

Sastoje se od kovinskih i keramičkih komponenti. Keramičke komponente uložene su u kovinsku vezivu fazu (npr. nikal). Osim karbida poznatih u tvrdim kovinama (WC, TiC, TaC) cermeti sadrže i spojeve s dušikom (npr. TiN). Sadašnji se cermeti sastoje pretežito od titanova karbonitrida i nikla optimiranjem svojstava s udjelom Ni, veličinom zrna Ti(C,N), omjerom C/N i s dodatkom TaC, NbC ili WC. Otpornost prema trošenju postiže se s TiC a TiN snizuje trenje i povećava otpornost prema naljepljenju strugotine na reznu pločicu.

Kubično kristalizirani borni nitrid (CBN) [3]

Iza dijamanta ovo je najtvrđa rezna tvar (tvrdoća 4500 HV 30). Postojan je do temperature 1 500 °C. Tlačna čvrstoća mu je 4 000 N/mm², a savojna čvrstoća 600 N/mm².

Kubično kristalizirani borni nitrid primjeren je za obradbu čelika tvrdoće 54 ... 68 HRC, slitine na temelju kobalta i nikla te brzoreznih čelika.

Dijamant

Dijamant je čisti ugljik. Ima dijamantnu kubičnu kristalnu rešetku. Pet je puta tvrđi (7000 HV 30) od tvrdih kovina, ali je savojna čvrstoća tek 300 N/mm². Dijamant je najtvrđa rezna tvar i najotpornija prema trošenju. Nedostatci su osjetljivost na udarce i niska tlačna čvrstoća (3000 N/mm²). Postojan je samo do temperature 600 °C; iznad 800 °C izgara.

U uporabi je prirodni monokristalni dijamant (za finu obradbu), prirodni polikristalni dijamant i umjetni polikristalni dijamant. Dijamantni alati primjereni su za obradbu aluminija, aluminijevih slitina, titana, bakra i bakrenih slitina, platine, zlata, srebra, umjetnih tvari, tvrde gume, grafita, keramike, stakla, kamena i azbesta.

Prevučene rezne tvari

Rezni alati od brzoreznih čelika prevlače se titanovim karbidom (TiC), titanovim nitridom (TiN) i titan-aluminijevim nitridom (TiAl)N. Za prevlačenje se primjenjuje postupak fizikalnog nanošenja slojeva (PVD)[1]. Za prevlačenje tvrdih kovina uglavnom se primjenjuje kemijsko nanošenje iz parne faze (CVD)[2]. Kombinacije osnovnih, razmjerno žilavih tvrdih kovina i slojeva prema ISO 513 jesu sljedeće:

Sloj/slojevi → Tvrda kovina ↓	TiC	TiN	TiC Ti(C, N) – TiN	Al_2O_3	TiC Al_2O_3	TiC Ti(C, N) – – TiN – Al_2O_3	HfN
M 15	•		•	×	×	×	×
M 25		×	•				×
P 40	•		×				
K 10	•	×	×	×			

Prema prijedlogu ISO (1988) obrađivane tvari razvrstane su u šest karakterističnih skupina (P, M, K, N, S i H). Prioritetni odnosno mogući izbor rezne tvari je sljedeći:

Obrađivane tvari						Rezna tvar	Nove oznake prema ISO Primjeri
čelik	visoko-legirani čelik	sivi lijev	neželjezne kovine	posebne tvari	tvrde tvari		
P	M	K	N	S	H		
×	×	×	×	×		standardni brzorezni čelik	S 6-5-2 [3]
×	×	×	×	×			S 6-5-2-5 [3]
×	×	×	×	×		prevučeni brzorezni čelik	HSS-TiN [4]
×	×	×	×	×		sinterirani brzorezni čelik	HSS-PM [4]
×	×			×			HSS-PM- TiN [4]
•	×			×		neprevučene standardne	HW-P01, HW-P40
×	•	×				tvrde kovine	HW-M10
		•	×		×		HW-K10, HW-K30
		×	•				HW-N10
•	×	×		×		prevučene standardne	HC- P10, HW-P35
	×	•				tvrde kovine	HC-K10
•	×	×				cermet na osnovi TiC	HT-P01, HT-P20
×		•			×	oksidna rezna keramika	CA-K10
×		•			×	miješana rezna keramika	CM-K05
×	×	×		•		miješana rezna keramika ojačana s vlaknima (whisker)	CM- S20
		•				nitridna rezna keramika	CN-K20
		×			•	kubično kristaliziran bor nitrid	BN-H05
			•			polikristalni dijamant	DP-N15

× moguća primjena, • preporučena primjena

Fusnote (str. 444):

1) grč. *keramos*, glina, ilovača.
2) engl. cermet od **cer**amic + **met**al.
3) engl. Cubic Boron Nitride.

Fusnote (str. 445):

1) engl. Physical Vapour Deposition.
2) engl. Chemical Vapour Deposition.
3) DIN 17350.
4) DBL 8335.

Aluminij (HRN C.C2.100 - 1986)

Osobite prednosti aluminija su mala gustoća i velika otpornost koroziji i kemijskim utjecajima. Aluminij ima također veliku toplinsku i električnu vodljivost.

Sastav

Oznaka	Dopuštene nečistoće (%) max									
	ukupno	Cu	Ng	Si	Fe	Zn	Mn	Ti	Ga	ostalo
Al 99,8.00	0,2	0,03	0,02	0,15	0,15	0,06	0,02	0,02	0,03	0,02
Al 99,7.00	0,3	0,03	0,03	0,20	0,25	0,07	0,03	0,03		0,03
Al 99,5.00	0,5	0,05	0,05	0,25	0,40	0,07	0,05	0,05		0,03
Al 99,3.00	0,7	0,05	0,05	0,7	0,7	0,10	0,05	0,05		0,05
Al 99,0.00	1,0	0,05	0,05	0,5	0,8	0,10	0,10	0,05		0,04

Gustoća aluminija iznosi od 2560 kg/m^3 (lijevanog) do 2750 kg/m^3 (kovanog, valjanog ili vučenog).

Mehanička svojstva aluminija (Al 99,5)

Stanje aluminija	Vlač. čvrst. R_m N/mm^2	Istezljivost % A_{10} %	Istezljivost % A_5 %	Tvrdoća HB
lijev	90 ... 120	25 ... 18	-	24 ... 32
trake i limovi				
mekani (žareni)	70	22	25	20
polutvrdo valjani	100	6	7	30
tvrdo valjani	130	4	5	35
šipke, žice, cijevi i profili				
mekani (prešani ili žareni)	70	18	20	20
polutvrdo vučeni	100	5	7	28
tvrdo vučeni	130 (... 170)	3	4	35

Najbolja svojstva u meko žarenom stanju dobivamo, ako nakon što veće plastične deformacije (70 ... 90% smanjenja presjeka) žarimo Al pri 360 ... 400 °C. Najveću kemijsku otpornost postižemo žarenjem pri 450 ... 500 °C.

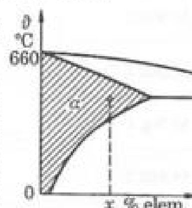
Žice za aluminijsku užad moraju imati istezljivost > 2 %. Pojedine se žice prije pletenja ispituju na izmjenično pregibanje i na uvijanje.

Aluminijske slitine

Aluminijske slitine imaju određene prednosti pred čistim aluminijem i to u čvrstoći i sposobnosti za lijevanje i gnječenje. Neke aluminijske slitine dosežu svojom znatnom čvrstoćom svojstva čelika.

Toplinsko (precipitacijsko) očvršćivanje aluminijskih slitina

Aluminijske slitine na temelju AlCu, AlCuNi, AlCuMg i AlMgSi mogu se toplinski (precipitacijski) očvršćivati.



x dodatni element
α čvrsta otopina

Toplinsko (precipitacijsko) očvršćivanje aluminijskih slitina se temelji na promjenljivoj topljivosti određenih elemenata (npr. Cu, Mg itd.) u aluminiju. Aluminij može u području ≈ 500 °C dobro otapati te elemente, dok mu je sposobnost za otapanje na nižim temperaturama neznatna. Ako čvrstu otopinu pri 500 °C brzo hladimo, otopljeni se elementi ne mogu pravodobno izlučiti, pa ostaju u prezasićenoj otopini. Kad se višak otopljenih elemenata s vremenom izluči u zrnima ili među njima, slitina postaje znatno čvršća (starenje).

Toplinsko (precipitacijsko) očvršćivanje aluminijskih slitina postižemo dakle žarenjem (4 ... 6 h) pri temperaturi određenoj za svaku slitinu (≈ 500 ... 570 °C) i gašenjem u vodi te naknadnim starenjem. Starenje je kod nekih slitina (npr. AlCuMg) prirodno – pri temperaturi okolice, u drugih pak (npr. AlMgSi) umjetno – pri povišenoj temperaturi (8 ... 15 h pri 100 ... 200 °C). Toplinski očvrsnute slitine imaju mnogo bolja mehanička svojstva i mogu se rabiti pri temperaturama do 120 °C. Toplinski očvrsnute slitine omekšavaju pri 360 ... 400 °C.

Aluminijske slitine sa Cu slabo su otporne prema koroziji.

Primjeri poznatijih trgovačkih naziva aluminijskih slitina

Naziv	Sastav (%) Al+
antikorodal	2,0 Si, 0,7 Mg, 06 ... 0,8 Mn, 0,1 ... 0,2 Ti
duralumin	3 ... 4,5 Cu, 02 ... 0,7 Si, 0 ... 1,6 Mg, 0 ... 1,2 Mn
duralumin K	0,5 ... 2 Mg, 03 ... 1,5 Si, 0 ... 1,5 Mn
duralumin W	3,5 ... 4,5 Cu, 1,8 ... 2,2 Ni, ... 1,8 Mg
duranalij	2,5 ... 9 Mg, 0,3 ... 0,6 Mn
duranalij 2S	2 ... 2,5 Mg, 1 ... 2 Mn
hidronalij	3 ... 12 Mg, 02 ... 1 Si, 0,2 ... 0,5 Mn
silal	1,5 ... 4,4 Cu, 0,6 ... 1,2 Mg, 0,6 ... 1 Mn, 0,3 ... 0,6 Si, ... 0,1 Ti
silal K	1,5 Mn, 0 ... 0,5 Mg
silal V	0,8 ... 1,5 Mg, 0,5 ... 1 Mn, 03 ... 0,7 Si, 03 Ti
silumin	12 ... 13,5 Si, 0,3 ... 0,45 Mn
silumin γ	12,25 ... 12,75 Si, 0,35 ... 0,65 Mn, 0,25 ... 0,35 Mg

Aluminijske slitine za gnječenje (HRN C.C2.100 – 1986)

Sastav (%) [1]

Oznaka ISO [2]	Al + Cu	Mg	Si	Fe	Zn	Mn	Cr	Ti + Zr
Al Mn 1	– 0,1	– 0,3	– 0,6	– 0,7	– 0,2	0,8 1,5	– 0,10	– 0,20
Al Mn 1 Cu	0,05 0,20		– 0,6	– 0,7	– 0,2	1,0 1,5	– 0,10	– 0,20
Al Mg 1	– 0,20	0,5 1,1	– 0,4	– 0,7	– 0,2	– 0,2	– 0,1	– 0,2
Al MG 2	– 0,10	1,7 2,4	– 0,5	– 0,5	– 0,2	– 0,5	– 0,35	– 0,2
Al Mg 3	– 0,10	2,6 3,5	– 0,5	– 0,5	– 0,2	– 0,4	– 0,35	– 0,2
Al Mg 4	– 0,10	3,5 4,6	– 0,5	– 0,5	– 0,2	– 0,8	– 0,35	– 0,2
Al Mg 5	– 0,10	4,5 5,6	– 0,5	– 0,5	– 0,2	– 0,5	– 0,35	– 0,2
Al Mg 3 Mn	– 0,10	2,4 3,4	– 0,5	– 0,5	– 0,2	0,3 1,0	– 0,25	– 0,2
Al Si 1 Mg	– 0,10	0,6 1,4	0,6 1,6	– 0,5	– 0,2	0,4 1,0	– 0,35	– 0,2
Al Mg Si 0,5	– 0,10	0,4 0,9	0,3 0,7	– 0,5	– 0,2	– 0,3	– 0,10	– 0,2
Al Mg 1 Si Cu	0,15 0,40	0,8 1,2	0,4 0,8	– 0,7	– 0,25	– 0,15	0,15 0,35	– 0,2
Al Cu 2 Mg	2,0 3,0	0,2 0,5	– 0,8	– 0,7	– 0,2	– 0,2	– 0,1	– 0,2
Al Cu 4 Mg Si	3,5 4,7	0,3 1,2	0,2 0,8	– 0,7	– 0,2	0,3 1,0		
Al Cu 4 Mg 1	3,8 4,9	1,0 1,8	– 0,5	– 0,5	– 0,2	0,3 1,2		
Al Cu 4 Si Mg	3,8 5,0	0,2 0,8	0,5 1,2	– 0,7	– 0,2	0,3 1,2		

[1] Gornji i donji brojevi znače granične vrijednosti sadržaja.
[2] Uzete su u obzir samo neke značajnije slitine, dok su druge sadržane u navedenoj normi.

Mehanička svojstva i uporaba nekih aluminijskih slitina za gnječenje
(prosječne vrijednosti)

Oznaka	Stanje [1]	Granica tečenja $R_{p0,2}$/(N/mm²)	Vlačna čvrstoća R_m/(N/mm²)	Istezljivost A_{10} %	Istezljivost A_5 %	Tvrdoća HB	Smjernice za porabu
Al Mn 1	meko žareno polutvrado tvrdo	40 100 120	90 120 150	18 5 3	20 6 4	22 35 42	Otporna prema koroziji, dobro se zavaruje
Al Mg 2	meko žareno polutvrdo tvrdo	80 140 180	180 230 260	13 7 3	15 8 4	45 55 65	otporna prema koroziji (morske vode)
Al Mg 3	meko žareno polutvrdo tvrdo	80 140 180	180 230 260	14 8 3	16 9 4	42 65 75	veća otpornost prema koroziji (i u morskoj vodi); s porastom % Mg smanjuje se zavarljivost
Al Mg 4	meko žareno polutvrdo tvrdo	100 160 220	230 270 310	24 7 3	16 9 4	52 72 85	
Al MG 5	meko žareno polutvrdo	130 200	240 340	14 7	16 8	65 90	
Al Si 1 Mg	meko žareno tvrdo toplinski očvrsnuto h. toplinski očvrsnuto t.	50 150 100 210	110 170 200 290	14 3 11 8	17 4 13 10	35 55 60 80	dobro se kali, otporna prema koroziji
Al Cu 4 Si Mg	meko žareno tvrdo toplinski očvrsnuto h. toplinski očvrsnuto h. g.	80 220 260 320	180 280 400 450	10 2 10 2	12 3 12 3	70 75 100 120	vrlo dobro se toplinski očvršćuje, prema koroziji neotporna
Al Cu 5 Pb Bi	toplinski očvrsnuto h.	250	380	10	12	100	za automate

Prešane aluminijske slitine za gnječenje imaju približno jednaka mehanička svojstva kao u meko žarenom stanju.

[1] h. – stareno pri temperaturi okolice (hladno), t. – stareno pri povišenoj temperaturi (toplo), g. – hladno gnječeno.

Aluminijske slitine za lijevanje (HRN C.C2.300 - 1983)

Sastav (%) [1]

Oznaka	Al +					Nečistoće (max)		
	Si	Cu	Mg	Ti	Mn	Fe	Zn	ostale
Slitine za lijevanje u pijesak ili kokilu								
Al Si 12 .00	11,0 13,5	(0,05)	(0,05)	(0,15)	0,01 0,4	0,50	0,10	
Al Si 12 Cu .00	11,0 13,5	0,1 1,2	(0,3)	(0,15)	0,2 0,5	0,8	0,5	[2]
Al Si 8 Cu 3.00	7,5 9,5	2,0 3,5	(0,3)	(0,15)	0,2 0,5	0,8	1,2	[3]
Al Si 6 Cu 4.00	5,0 7,5	3,0 5,0	0,1 0,3	(0,15)	0,01 0,6	1,0	2,0	[4]
Al Si 10 Mg .00	9,0 11,0	(0,05)	0,2 0,5	(0,15)	0,01 0,4	0,5	0,10	
Al Si 5 Mg .00	5,0 6,0	(0,05)	0,4 0,8	0,01 0,20	0,01 0,4	0,50	0,10	
Al Mg 5 Si .00	0,9 1,5	(0,05)	4,5 5,5	0,01 0,20	0,01 0,4	0,50	0,10	
Al Mg 3 Si 1.00	0,9 1,3	(0,05)	2,5 3,5	0,01 0,20	0,01 0,4	0,50	0,10	
Al Mg 3.00	(0,5)	(0,05)	2,5 3,5	0,01 0,20	0,01 0,4	0,3	0,10	
Al Cu 4 MG Ti .00	(0,18)	4,2 4,9	0,15 0,3	0,15 0,30	(0,05)	0,20	0,07	
Slitine za tlačno lijevanje								
Al Si 12 (Fe) .00	11,0 13,5	(0,10)	(0,1)	(0,15)	0,01 0,4	1,3	0,10	
Al Si 12 Cu (Fe) .00	11,0 13,5	0,1 1,2	(0,3)	(0,15)	0,2 0,5	1,3	0,8	[2]
Al Si 8 Cu 3 (Fe) .00	7,5 9,5	2,0 3,5	(0,3)	(0,15)	0,2 0,5	1,5	2,0	[3]
Al Si 6 Cu 4 (Fe) .00	5,0 7,5	3,0 5,0	0,1 0,3	(0,15)	0,3 0,6	1,3	2,0	[4]
Al Si 10 Mg (Fe) .00	9,0 11,0	(0,05)	0,2 0,5	(0,15)	0,01 0,4	1,3	0,2	
Al Mg 10.00	0,1 2,5	(0,05)	8,0 10,5	(0,15)	0,2 0,5	1,0	0,10	

[1] Gornji i donji brojevi znače granične vrijednosti. – U zagradama su najveće dozvoljene vrijednosti elemenata kao nečistoća.

[2] 0,2 Ni; 02Pb; 01 Sn.

[3] 0,3 Ni; 0,2 Pb; 0,2 Sn;

[4] 0,3 Ni; 03 Pb; 0,1 Sn.

Mehanička svojstva i uporaba slitina za lijevanje u pijesak ili kokilu

Oznaka [1]	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Istezljivost A_5 %	Tvrdoća HB	Uporaba
Al Si 12.01	70 ... 100	160 ... 210	5 ... 10	45 ... 60	tanke stijenke odljevaka, dobra kemijska otpornost
63	80 ... 110	160 ... 210	6 ... 12	50 ... 60	
02	80 ... 110	180 ... 240	6 ... 12	50 ... 60	
64	80 ... 110	180 ... 240	6 ... 12	50 ... 60	
Al Si 12 Cu .01	80 ... 100	150 ... 220	1 ... 4	50 ... 65	tanke stijenke, kemijski manje otporan
02	90 ... 120	180 ... 260	2 ... 4	50 ... 75	
Al Si 8 Cu 3.01	100 ... 150	160 ... 200	1 ... 3	65 ... 90	više temperature
02	100 ... 160	170 ... 220	1 ... 3	70 ... 100	
Al Si 6 Cu 4.01	100 ... 150	160 ... 200	1 ... 3	60 ... 80	više temperature
02	120 ... 180	180 ... 240	1 ... 3	70 ... 100	
Al Si 10. Mg .01	80 ... 100	170 ... 220	2 ... 6	50 ... 60	veća tvrdoća, za motore, prehrambena industrija
81	180 ... 260	200 ... 320	1 ... 4	80 ... 100	
02	90 ... 120	180 ... 240	2 ... 6	60 ... 80	
82	210 ... 280	240 ... 320	1 ... 4	85 ... 115	
Al Si 5 Mg .01	100 ... 130	140 ... 180	1 ... 3	55 ... 70	za motore, prehrambena industrija
61	150 ... 180	180 ... 250	2 ... 5	70 ... 85	
81	220 ... 290	240 ... 300	0,5 ... 2	80 ... 110	
02	120 ... 160	160 ... 200	1,5 ... 4	60 ... 75	
62	160 ... 190	210 ... 270	2 ... 8	70 ... 90	
82	240 ... 290	260 ... 320	1 ... 3	90 ... 100	
Al Mg 5 Si .01	110 ... 130	160 ... 200	2 ... 4	60 ... 75	otpornost prema morskoj vodi
02	110 ... 150	180 ... 240	2 ... 5	65 ... 85	
Al Mg 3 Si 1.01	80 ... 100	140 ... 190	3 ... 8	50 ... 60	više temperature, ukrasni predmeti
81	120 ... 160	200 ... 280	2 ... 8	65 ... 90	
02	80 ... 100	150 ... 200	4 ... 10	50 ... 65	
82	120 ... 180	220 ... 300	3 ... 10	65 ... 90	
Al Mg 3.01	70 ... 100	140 ... 190	3 ... 8	50 ... 60	otpornost prema morskoj vodi, ukrasni predmeti
02	70 ... 100	150 ... 200	5 ... 12	50 ... 60	
Al Cu 4 Mg Ti .61	220 ... 280	300 ... 400	5 ... 15	90 ... 115	za dijelove s velikom tvrdoćom
81	240 ... 350	350 ... 420	3 ... 10	95 ... 125	
62	220 ... 300	320 ... 420	8 ... 18	95 ... 115	
82	260 ... 380	350 ... 440	3 ... 12	100 ... 130	

[1] Dodatne oznake znače:
01 - lijevano u pijesak, 02 - lijevano u kokilu;
61 - lijevano u pijesak, 62 - lijevano u kokilu } i toplinski očvrsnuto s prirodnim starenjem
63 - lijevano u pijesak, 64 - lijevano u kokilu } i meko žareno te gašeno,
81 - lijevano u pijesak, 82 - lijevano u kokilu } i toplinski očvrsnuto s prirodnim starenjem.

Mehanička svojstva i uporaba aluminijskih slitina za tlačni lijev

Oznaka [1]	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Istezljivost A_5 %	Tvrdoća HB	Uporaba
AlSi 12.05 AlSi 12 (Fe).05	140 ... 180	220 ... 280	1 ... 3	60 ... 80	tanke stijenke, dobra kemijska otpornost
AlSi 12 CU .05 AlSi 12 Cu (Fe) .05	140 ... 220	220 ... 300	–	60 ... 80	tanke stijenke, slaba kemijska otpornost
Al Si 8 CU 3.05 Al Si 8 Cu3 (Fe) .05	160 ... 240	240 ... 310	0,5 ... 3	70 ... 100	više temperature, šira uporaba
Al Si 6Cu 4.05 AlSi 6Cu4 'Fe) .05	150 ... 220	220 ... 300	0,5 ... 3	80 ... 110	više temperature, šira uporaba
AlSi 10 Mg .05 AlSi 10 MG (Fe) .05	140 ... 200	220 ... 300	1 ... 3	70 ... 90	motori, prehrambena industrija
AlMg 10.05	140 ... 220	220 ... 300	1 ... 5	70 ... 100	kemijska otpornost, ukrasni predmeti

Magnezijske slitine

Sam magnezij je premekan za neposrednu uporabu. Potrebnu čvrstoću dobiva tek legiranjem. Magnezijske se slitine odlikuju osobito malom gustoćom, približno 1 800 kg/m³. Nisu posebno otporne prema koroziji.

»Elektron« je zajednički naziv za više magnezijskih slitina koje osim Mg sadrže uglavnom do 10 % Al, do 4,5 % Zn, do 2,2 % Mn i do 1,5 % Si.

Magnezijske slitine za gnječenje (DIN 1729/1 – 1982)

Sastav i uporaba

Oznaka DIN	Sastav % [2] MG + Al	Zn	Mn	Dopuštene nečistoće %, max	Smjernice sa uporabu
Mg Mn 2	–	–	1,2 2,0	0,1 Si 0,05 Cu	otporna prema koroziji, dobro se zavaruje
Mg Al 6 Zn	5,5 7,0	0,5 1,5	0,15 0,4	0,1 Si 0,1 Cu	može se djelomice zavarivati
Mg Al 8 Zn	7,8 9,2	0,2 0,8	0,12 0,3	0,1 Si 0,05 Cu	može se toplinski očvrsnuti

[1] Dodatna oznaka 05 znači tlačni lijev.
[2] Gornji i donji brojevi znače granične vrijednosti sadržaja.

Mehanička svojstva

Oznaka	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Istezljivost A_5 %	Istezljivost A_{10} %	Tvrdoća HB
Mg Mn 2	100 ... 160	200 ... 220	1,5 ... 2	1,5 ... 2	40
Mg Al 6 Zn	160 ... 190	270 ... 280	6 ... 10	8 ... 11	55

Magnezijske slitine za lijevanje (DIN 1729/2 – 1973)

Oznaka i sastav

Oznaka DIN [1]	Sastav % Al	Zn	Mn	nečistoće$_{max}$ Si	Cu	ostale
G - Mg Al 8 Zn 1 **GK - Mg Al 8 Zn 1** **GD - Mg Al 8 Zn 1**	7,5 ... 9,0	0,3 ... 1,0	0,15 ... 0,3	0,30	0,20	0,20
G - Mg Al 9 Zn 1 **GK - Mg Al 9 Zn 1** **GD - Mg Al 9 Zn 1**	8,3 ... 10,0	0,3 ... 1,0	0,15 ... 0,3	0,30	0,20	0,20
G - Mg Al 9 Zn 2 **Gk - Mg Al 9 Zn 2** **GD - Mg Al 9 Zn 2**	7,5 ... 9,5	0,5 ... 2,0	0,15 ... 0,3	0,50	0,35	0,20

Mehanička svojstva

Oznaka DIN	Način lijevanja [2]	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Istezljivost A_5 %	Tvrdoća HB	Dinamička izdržljivost na savijanje [3] R_d N/mm²
G - Mg Al 8 Zn 1	p	90 ... 120	160 ... 220	2 ... 6	60 ... 65	70 ... 90
GK - Mg Al 8 Zn 1	k	90 ... 120	160 ... 220	2 ... 6	50 ... 65	70 ... 90
GD - Mg Al 8 Zn 1	t	140 ... 160	200 ... 240	1 ... 2	60 ... 85	50 ... 60
G - Mg Al 9 Zn 1	p h	110 ... 130	240 ... 280	6 ... 10	55 ... 70	80 ... 100
	p o	140 ... 150	240 ... 280	2 ... 4	65 ... 90	80 ... 100
GK - Mg Al 9 Zn 1	k h	110 ... 130	240 ... 280	6 ... 10	55 ... 70	80 ... 100 ±
	k o	140 ... 150	240 ... 280	2 ... 4	65 ... 90	80 ... 100
GD - Mg Al 9 Zn 1	t	150 ... 170	220 ... 250	0,5 ... 1,5	65 ... 85	40 ... 50
G - Mg Al 9 Zn 2	p	90 ... 130	160 ... 220	2 ... 5	50 ... 70	70 ... 90
GK - Mg Al 9 Zn 2	k	90 ... 130	160 ... 220	2 ... 5	50 ... 70	70 ... 90
GD - Mg Al 9 Zn 2	t	140 ... 170	200 ... 250	0,5 ... 2	60 ... 85	40 ... 50

[1] Početni dijelovi oznake znače: G - lijevanje u pijesak, GK - lijevanje u kokilu, GD - tlačni lijev.
[2] p - lijevano u pijesak, k - lijevano u koliku, t - tlačni lijev; h - homogenizirano, o - toplinski očvrsnuto.
[3] Pri 50 · 10⁶ titraja.

BAKAR I BAKRENE SLITINE

Bakar

Katodni bakar je elektrolitički rafinirani (na katodi izlučeni) bakar, namijenjen ponajprije pretaljivanju u elektrolitski bakar.

S obzirom na način rafiniranja razlikujemo:

- *talionički bakar*, dobiven pirometalurškom rafinacijom
- *elektrolitski bakar*, dobiven pretaljivanjem katodnog bakra.

S obzirom na kisik u bakru razlikujemo:

- *bakar bez kisika*, taljen u zaštitnoj atmosferi ili vakuumu
- *bakar s kisikom*, taljen u oksidacijskoj atmosferi
- *dezoksidirani bakar*, dobiven uporabom kovinskih ili nekovinskih dezoksidanat.

Normirane vrste bakra (HRN C.D1.002 – 1986)

Oznaka	Sastav (%) [1]			Napomena
	Cu_{min}	O	P	
Katodni bakar				
EK 1-Cu	99,99			za katode
EK2-Cu	99,95			
Bakar bez kisika				
EB1-CU	99,99	0,001		elektrolitski bakar
EB-2Cu	99,95			
Bakar s kisikom				
ET1- Cu	99,90	0,005 ... 0,04		elektrolitski bakar
ET2-Cu	99,90	0,005 ... 0,04		talionički bakar
T1-Cu	99,90	0,005 ... 0,08		za lijevanje
T2-Cu	99,70	... 0,01		
Dezoksidirani bakar				
ED- Cu	99,90		0,003	elektrolitski bakar
DNP-Cu	99,90		0,005 ... 0,014	s malo P
DVP1-Cu	99,90		0,015 ... 0,04	s mnogo P
DVP2-Cu	99,70		0,015 ... 0,05	

[1] Za elektrotehnički bakar nije odlučujući kemijski sastav (EB1-Cu, EB2-CU, ET1-Cu, ET2-Cu i ED-Cu), već samo električna provodnost γ (u mekom stanju, pri 20 °C: najmanje 58 m/(Ω mm^2) (= 58 MS/m).

Mehanička svojstva bakra

Stanje	Vlačna čvrstoća $\frac{R_m}{N/mm^2}$	Istezljivost $\frac{A_5}{\%}$	Tvrdoća HB
meko	210 ... 250	> 38	40 ... 60
polutvrdo	250 ... 300	> 10	60 ... 90
tvrdo	> 300	> 6	> 90

Bakrene slitine za gnječenje (HRN C.D2.100 – 1982)

Slitine bakra s cinkom (»Mjedi«)

Oznaka i sastav

Oznaka	Sastav %		
	Cu	Zn	nečistoće (max)
Cu Zn 5.00	94,0 ... 96,0	ostatak	0,2 Ni ostale ukupno 0,3 (Al, Fe, Mn, Pb, Sn, Sb)
Cu Zn 10.00	89,0 ... 91,0		
Cu Zn 15.00	84,0 ... 86,0		
Cu Zn 20.00	79,0 ... 81,0		
Cu Zn 28.00	69,0 ... 73,0		
Cu Zn 30.00	69,0 ... 71,0		
Cu Zn 33.00	66,0 ... 68,5		
Cu Zn 36.00	63,4 ... 65,0		0,3 Ni, 0,1 ... 0,2 Pb ostale ukupno 0,5
Cu Zn 37.00	62,0 ... 64,5		
Cu Zn 40.00	59,0 ... 61,5		

Mehanička svojstva (prosječne vrijednosti) i smjernice za uporabu

Oznaka	Stanje slitine	Vlačna čvrst. $\frac{R_m}{N/mm^2}$	Istezljivost $\frac{A_{10}}{\%}$	$\frac{A_5}{\%}$	Tvrdoća HB	Smjernice za uporabu
Cu Zn 10.00	meka	250	40	–	55	instalacijski dijelovi za elektrotehniku, ukrasni predmeti
	polutvr.	320	30	–	70	
	tvrda	400	15	–	90	
Cu Zn 15.00	meka	250	40	–	55	
	polutvr.	320	30	–	70	
	tvrda	400	15	–	90	
Cu Zn 20.00	meka	260	40	–	55	cijevi za manometre, instalacijski dijelovi za elektrotehniku, ukrasni predmeti
	polutvr.	330	30	–	70	
	tvrda	420	15	–	90	

Mehanička svojstva (prosječne vrijednosti) i smjernice za uporabu (*konac*)

Oznaka	Stanje slitine	Vlačna čvrst. R_m N/mm²	Istezljivost A_{10} %	Istezljivost A_5 %	Tvrdoća HB	Smjernice za uporabu
Cu Zn 28.00	meka	250	40	45	50	vrlo dobra za hladno oblikovanje, može se platirati čelikom, cijevi, duboke posude
	polutvr.	320	30	32	70	
	tvrda	380	18	20	90	
Cu Zn 30.00	meka	260	40	45	52	
	polutvr.	340	24	26	80	
	tvrda	430	12	14	100	
Cu Zn 33.00	meka	280	40	45	55	povećana sposobnost za hladno oblikovanje, žičane mreže, cijevne zakovice, vijci
	polutvr.	380	15	18	90	
	tvrda	500	5	6	115	
Cu Zn 37.00	meka	290	45	48	60	najvažnija slitina za hladno oblikovanje (vučenje, valjanje, prešanje); vijci, cijevi
	polutvr.	350	25	28	75	
	tvrda	410	15	17	95	
Cu Zn 40.00	meka	240	30	33	70	za toplo i hladno oblikovanje; dijelovi za prešanje u toplom stanju
	polutvr.	410	15	18	95	
	tvrda	480	10	12	125	

Slitine bakra s cinkom i olovom (»Mjedi s olovom«)

Oznaka i sastav

Oznaka	Sastav % Cu	Pb	Zn	nečistoće (max) Ni	ostale
Cu Zn 36 Pb 1,5 .00	62,0 ... 64,00	0,7 ... 2,5	ostatak	0,3	0,5
Cu Zn 36 Pb 3 .00	60,0 ... 62,0	2,5 ... 3,5	ostatak	0,3	0,5
Cu Zn 38 Pb 1,5 .00	59,5 ... 61,5	1,5 ... 2,5	ostatak	0,3	0,5
Cu Zn 39 Pb 2 .00	57,0 ... 59,0	1,5 ... 2,5	ostatak	0,3	1,0
Cu Zn 39 Pb 3 .00	57,0 ... 59,0	2,5 ... 3,5	ostatak	0,5	1,0
Cu Zn 44 Pb 2 .00	53,5 ... 56,0	1,00 ... 2,5	ostatak	0,5	1,0

Mehanička svojstva (prosječne vrijednosti) i smjernice za uporabu

Oznaka	Stanje slitine	Vlačna čvrst. R_m N/mm²	Istezljivost A_{10} %	Istezljivost A_5 %	Tvrdoća HB	Smjernice za uporabu
Cu Zn 36 Pb 3.00	meka	340	30	33	70	za toplo i hladno oblikovanje, dijelovi za prešanje u toplom stanju
	polutvr.	410	15	18	95	
	tvrda	480	10	12	125	
Cu Zn 39 Pb 2.00	meka	370	25	28	75	najvažnija slitina za oblikovanje odvajanjem čestica (slit. za automate), razni strojni dijelovi
	polutvr.	440	10	12	105	
	tvrda	510	5	6	125	

Posebne slitine bakra s cinkom (»Posebne mjedi«)

Oznaka	Sastav % Cu	Al	Mn	ostalo
Cu Zn 20 Al 2.00	76,0 ... 79,0	1,8 ... 2,3	–	0,02 ... 0,035 As
Cu Zn 28 Sn 1.00	70,0 ... 73,0	–	–	0,9 ... 1,3 Sn [1)]
Cu Zn 31 Si 1.00	66,0 ... 70,0	–	–	0,7 ... 1,3 Si
Cu Zn 35 Ni 2,5.00	58,0 ... 61,0	0,3 ... 1,5	1,5 ... 2,5	2,0 ... 3,0 Ni
Cu Zn 38 Sn 1.00	59,5 ... 63,5	–	–	0,7 ... 1,4 Sn
Cu Zn 40 Al 1.00	56,5 ... 59,5	0,4 ... 1,6	0,4 ... 1,8	–
Cu Zn 40 Al 2.00	55,5 ... 59,0	1,3 ... 2,3	1,0 ... 2,4	–
Cu Zn 40 Ni 2.00	56,0 ... 58,0	0,5 ... 1,0	–	1,0 ... 2,0 Ni
Cu Zn 40 Mn 2.00	57,0 ... 59,0	–	1,0 ... 2,5	–
Cu Zn 38 Al 2 Mn 3 Ni .00	61,0 ... 63,0	2,0 ... 3,0	3,0 ... 4,0	0,3 ... 0,5 Ni [2)]
Cu Zn 39 Al Fe Mn .00	56,0 ... 61,0	0,2 ... 1,5	0,2 ... 2,0	0,2 ... 1,5 Fe

Slitine bakra s kositrom (»Kositrena bronca«)

Oznaka	Sastav % Sn	P	Cu	Uporaba
Cu Sn 2.00	1,0 ... 2,5	0,01 ... 0,4	ostatak	vijci, opruge, za elektr. vodljive opruge
Cu Sn 6.00	5,5 ... 7,5	0,01 ... 0,4	ostatak	opruge, savitljive cijevi za manometre, mreže za sita
Cu Sn 8.00	7,5 ... 9,0	0,01 ... 0,4	ostatak	opruge, cijevi veće otpornostitrošenju i koroziji

Slitine bakra s kositrom i cinkom (»Crvena kovina«)

Oznaka	Sastav % Sn	Zn	Pb	P_{max}	Cu	Uporaba
Cu Sn 4 Zn 4.00	3,0 ... 5,0	3,0 ... 5,3	–	0,1	ostatak	za manometarske opruge
Cu Sn 4 Pb 4 Zn 4.00	3,0 ... 5,0	3,0 ... 5,0	3,0 ... 5,0	0,4	ostatak	za klizne ležaje

1) Također 0,02 ... 0,035 As.
2) Također 0,3 ... 0,7 Fe.

Slitine bakra s aluminijem (»Aluminijske bronce«)

Oznaka	Sastav %					Uporaba
	Al	Mn	Ni	As,Fe	Cu	
				As		
Cu Al 5.00	4,0 ... 6,0	0,00 ... 0,3	0,0 ... 0,8	–	ostatak	za kočne pojase, prigušivače oscilacija
Cu Al 5 As .00	4,0 ... 6,0	–	–	0,0 ... 0,8	ostatak	
Cu Al 8.00	7,0 ... 9,0	0,0 ... 0,5	0,0 ... 0,5	–	ostatak	otpornost prema sumpornoj i octenoj kiselini
				Fe		
Cu Al 8 Fe 3.00	6,5 ... 8,5	0,0 ... 0,8	0,0 ... 0,8	1,5 ... 3,5	ostatak	velika čvrstoća (i na povišenoj temperaturi), otpornost prema kiselinama i morskoj vodi te vatri
Cu Al 10 Fe 3.00	8,5 ... 11,0	1,5 ... 3,5	0,0 ... 1,0	2,0 ... 4,0	ostatak	
Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.00	8,5 ... 11,5	0,0 ... 1,5	4,0 ... 6,0	2,0 ... 8,0	ostatak	
Cu Al 9 Mn 2.00	8,0 ... 10,0	1,5 ... 2,5	–	–	ostatak	

Slitine bakra s niklom (»Niklena bronca«)

Oznaka	Sastav %				Uporaba
	Ni	Fe	Mn	Cu	
Cu Ni 5 Fe 1 Mn .00	4,0 ... 6,0	1,0 ... 1,5	0,3 ... 0,8	ostatak	za cijevi i aparate
Cu Ni 10 Fe 1 Mn .00	9,0 ... 11,0	1,0 ... 2,0	0,3 ... 1,0	ostatak	osobita otpornost prema eroziji, koroziji i kavitaciji
Cu Ni 20.00	19,0 ... 22,0	–	0,0 ... 0,5	ostatak	sposobnost za duboko izvlačenje, platiranje
Cu Ni 20 Mn 1 Fe .00	19 ... 22,0	0,4 ... 1,0	0,5 ... 1,5	ostatak	za kondenzatorske cijevi
Cu Ni 25.00	24,0 ... 26,0	–	0,0 ... 0,5	ostatak	za kovani novac i platiranje
Cu Ni 30 Mn 1 Fe .00	29,0 ... 32,0	0,4 ... 1,0	0,5 ... 1,5	ostatak	velika otpornost prema eroziji, koroziji i kavitaciji
Cu Ni 44 Mn 1.00	43,0 ... 45,0	–	0,5 ... 2,0	ostatak	sposobnost oblikovanja, lako oksidira

Slitine bakra s niklom i cinkom (»Novo srebro«)

Oznaka	Sastav %				Uporaba
	Cu	Ni	Pb	Zn	
Cu Ni 10 Zn 27.00	61,0 ... 65,0	8,0 ... 11,0	–	ostatak	dobro se lijeva i preša; za unutnju arhitekturu
Cu Ni 10 Zn 42 Pb 2.00	45,0 ... 48,0	9,0 ... 11,0	0,5 ... 2,0	ostatak	dobro se preša i kuje, za opću uporabu
Cu Ni 12 Zn 24.00	62,0 ... 66,0	11,0 ... 13,0	–	ostatak	dobra spos. obl., za opruge; za pribor za jelo
Cu Ni 15 Zn 21.00	63,0 ... 67,0	13,5 ... 16,5	–	ostatak	dobro se preša, kuje i obrađuje
Cu Ni 18 Zn 20.00	60,0 ... 64,0	17,0 ... 19,0	–	ostatak	dobra sposobnost obl., za ukrasne predmete
Cu Ni 18 Zn 27.00	59,0 ... 63,0	17,0 ... 19,0	–	ostatak	općenito
Cu Ni 18 Zn 19 Pb 1.00	59,0 ... 63,0	17,0 ... 19,0	0,3 ... 1,5	ostatak	za preciznu mehaniku i optiku; ključeve

Poznati trgovački nazivi za novo srebro: alpaka, argentan, pakfong. »Kinesko srebro« je starije ime za posrebreno novo srebro.

*

Slitina bakra sa silicijem (»silicijska bronca«) – (2,8 ... 3,5 % Si; 1 ... 1,5 % Mn; ost. Cu) – služi za opruge koje su električni vodiči, kovinska sita itd.

Slitina bakra s berilijem (»berilijska bronca«) – (1,5 ... 2,5 % Be) – lako se kali (otvrdnjava), čime se postiže tvrdoća do 400 HB.

Bakrene slitine za lijevanje (HNR C.D2.300 – 1980/1986)

Slitine bakra sa cinkom i olovom (»Mjedi za lijevanje«)

Oznaka i sastav

Oznaka	Sastav %			
	Cu	Pb	Al	Zn
Cu Zn 33 **Pb 2**.00	63,0 ... 67,0	1,0 ... 3,0	–	ostatak
Cu Zn 39 **Pb** .00	60,0 ... 63,0	0,5 ... 2,0	0,0 ... 0,5	ostatak
Cu Zn 40 **Pb** .00	58,0 ... 63,0	0,5 ... 2,5	0,2 ... 0,8	ostatak

Mehanička svojstva i uporaba

Oznaka	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ / N/mm^2	Vlačna čvrstoća R_m / N/mm^2	Istezljivost A_5 / %	Tvrdoća HB 10/1000	Uporaba
P. Cu Zn 33 Pb 2.01	70	180	12	450	otpornost prema koroziji, armature
K. Cu Zn 39 Pb .02	80	250	25	750	armature za plin i vodu
T. Cu Zn 39 Pb .05	120	250	15	750	
P. Cu Zn 40 Pb .01	–	220	15	–	armataure, okovi, precizna mehanika
K. Cu Zn 40 Pb .02 T. Cu Zn 40 Pb .05	120	280	15	750	

Slitine bakra sa cinkom te aluminijem, željezom i manganom (»Posebne mjedi za lijevanje«)

Oznaka i sastav

Oznaka	Sastav %				
	Cu	Al	Fe	Mn	Zn
Cu Zn 25 Al 6 Fe 3 Mn 3.00	60,0 ... 66,0	4,5 ... 7,0	2,0 ... 4,0	1,5 ... 4,0	ostatak
Cu Zn 26 Al 4 Fe 3 Mn 3.00	60,0 ... 66,0	2,5 ... 5,0	1,5 ... 4,0	1,5 ... 4,0	ostatak
Cu Zn 35 Al Fe Mn .00	57,0 ... 65,0	0,5 ... 2,5	0,5 ... 2,0	0,1 ... 3,0	ostatak

Mehanička svojstva i uporaba

Oznaka	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlač. čvrst. R_m N/mm²	Istezljivost A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Uporaba
P. Cu Zn 25 Al 6 Fe 3 Mn 3.01	400	725	10	1 800	statički jako opterećeni dijelovi konstrukcija
C. Cu Zn 25 Al 6 Fe 3 Mn 3.03 N. Cu Zn 25 Al 6 Fe 3 Mn 3.04	400	740	10	1 900	
P. Cu Zn 26 Al 4 Fe 3 Mn 3.01	300	600	18	1 400	velika čvrstoća i tvrdoća
C. Cu Zn 26 Al 4 Fe 3 Mn 3.03 N. Cu Zn 26 Al 4 Fe 3 Mn 3.04	300	600	18	1 500	
P. Cu Zn 35 Al Fe Mn .01	170	450	20	1 100	umjerena klizna mehanička svojstva, brodski propeleri
K. Cu Zn 35 Al Fe Mn .02 C. Cu Zn 35 Al Fe Mn .03 N. Cu Zn 35 Al Fe Mn .04 T. Cu Zn 35 Al Fe Mn .05	200	475	18	1 100	

Slitine bakra s kositrom (»Kositrena bronca za lijevanje«)

Oznake i sastav

Oznaka	Sastav %				
	Cu	Sn	Ni	Pb	P
Cu Sn 14.00	85,0 ... 87,0	12,9 ... 15,0	–	–	< 0,2
Cu Sn 12.00	85,0 ... 88,5	10,8 ... 12,8	–	–	0,05 ... 0,40
Cu Sn 12 Ni 2.00	84,0 ... 87,5	11,0 ... 13,0	1,5 ... 2,5	–	0,05 ... 0,40
Cu Sn 12 Pb 2.00	84,0 ... 87,5	11,0 ... 13,0	–	1,2 ... 2,5	0,05 ... 0,40
Cu Sn 11 P.00	86,0 ... 89,5	10,0 ... 12,0	–	–	0,15 ... 1,5
Cu Sn 10.00	88,0 ... 91,0	9,0 ... 10,7	–	–	–
Cu Sn 10 P.00	87,0 ... 89,5	10,0 ... 11,5	–	–	0,5 ... 1,0

Mehanička svojstva i uporaba

Oznaka	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Istezljivost A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Uporaba
P. Cu Sn 14.01	140	200	3	850	velika otpornost prema koroziji i morskoj vodi
C. Cu Sn 14.03	150	220	1,5	950	
N. Cu Sn 14.04	150	220	2	950	
P. Cu Sn 12.01	130	240	6	800	velika otpornost prema trošenju, koroziji i morskoj vodi
K. Cu Sn 12.02	150	270	4	–	
C. Cu Sn 12.03	150	270	4	950	
N. Cu Sn 12.04	150	270	4	900	
P. Cu Sn 12 Ni 2.01	160	280	12	900	dobra otpornost prema trošenju, koroziji i morskoj vodi
C. Cu Sn 12 Ni 2.03	180	300	8	1 000	
N. Cu Sn 12 Ni 2.04	180	300	10	1 000	

Mehanička svojstva i uporaba (*konac*)

Oznaka	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Istezljivost A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Uporaba
P. Cu Sn 12 Pb 2.01	130	240	4	800	dobra otpornost prema trošenju, koroziji i morskoj vodi
C. Cu Sn 12 Pb 2.03	150	280	5	900	
N. Cu Sn 12 Pb 2.04	150	280	7	900	
P. Cu Sn 10.01	130	240	5	700	velika žilavost, otpornost prema koroziji i morskoj vodi
C. Cu Sn 10.03	150	270	7	950	
N. Cu Sn 10.04	150	270	7	900	

Slitine (P., K., C., N.) Cu Sn 11 P.00 i Cu Sn 10 P.00 (01, 02, 03, 04) su otporne prema trošenju, koroziji i morskoj vodi.

Slitine bakra s olovom i kositrom (»Olovno-kositrena bronca za lijevanje«)

Sastav

Oznaka	Sastav %		
	Cu	Pb	Sn
Cu Pb 9 Sn 5.00	80,0 ... 87,0	8,0 ... 10,0	4,0 ... 6,0
Cu Pb 10 Sn 10.00	78,0 ... 82,0	8,0 ... 11,0	9,0 ... 11,0
Cu Pb 15 Sn 8.00	75,0 ... 79,0	13,0 ... 17,0	7,0 ... 9,0
Cu Pb 20 Sn 5.00	70,0 ... 78,0	18,0 ... 23,0	4,0 ... 6,0

Mehanička svojstva i uporaba

Oznaka	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlač. čvrst. R_m N/mm²	Istezljivost A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Uporaba
P. Cu Pb 9 Sn 5.01	80	160	7	–	otpornost prema koroziji (parama sumporne i solne kiseline), klizni ležaji
K. Cu Pb 9 Sn 5.02	80	200	5	–	
C. Cu Pb 9 Sn 5.03	80	220	6	–	
N. Cu Pb 9 Sn 5.04	130	230	9	–	
P. Cu Pb 10 Sn 10.01	80	180	7	650	dobra otpornost prema trošenju i koroziji, klizni ležaji
C. Cu Pb 10 Sn 10.03	140	220	3	700	
N.Cu Pb 10 Sn 10.04	110	220	6	700	
P. Cu Pb 15 Sn 8.01	80	170	5	600	dobra klizna svojstva, otpornost prema sumporu i solnoj kiselini
C. Cu Pb 15 Sn 8.03	100	220	8	650	
N. Cu Pb 15 Sn 8.04	100	220	8	650	
P. Cu Pb 20 Sn 5.01	60	150	5	500	dobra klizna svojstva, otpornost prema koroziji
N. Cu Pb 20 Sn 5.04	80	180	7	–	

Slitine bakra s kositrom, cinkom i olovom (»Crveni lijev«)

Oznaka	Sastav %			
	Cu	Sn	Zn	Pb
Cu Sn 10 Zn 2.00	86,0 ... 89,0	9,1 ... 11,0	1,0 ... 3,0	-
Cu Sn 8 Pb 2.00	82,0 ... 91,0	6,0 ... 9,0	-	0,5 ... 4,0
Cu Sn 7 Pb Zn 3.00	81,0 ... 85,0	6,0 ... 8,0	2,0 ... 5,0	5,0 ... 8,0
Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5.00	84,0 ... 86,0	4,0 ... 6,0	4,0 ... 6,0	4,0 ... 6,0
Cu Sn 3 Zn 9 Pb 7.00	78,0 ... 82,0	2,5 ... 3,5	7,0 ... 10,0	6,0 ... 8,0

Mehanička svojstva i uporaba

Oznaka	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlač. čvrst. R_m N/mm²	Istezljivost A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Uporaba
P. Cu Sn 10 Zn 2.01 C. Cu Sn 10 Zn 2.03 N. Cu Sn 10 Zn 2.04	120 149 140	240 270 270	12 7 7	750 850 800	umjereno opterećeni klizni dijelovi, otpornost prema morskoj vodi
P. Cu Sn 8 Pb 2.01 K.Cu Sn 8 Pb 2,02 C. Cu Sn 8 Pb 2.03 N. Cu Sn 8 Pb 2.04	130 130 130 130	250 220 230 270	16 2 4 5	- - - -	otpornost prema morskoj vodi i koroziji, za armature i kućišta pumpi
P. Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3,01 [1] C. Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3,03 [2]	100 120	210 260	12 12	650 750	otpornost prema koroziji i morskoj vodi
P. Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5.01 [3] C. Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5.03 [4]	90 100	200 250	13 13	600 -	otpornost prema koroziji i morskoj vodi
P. Cu Sn 3 Zn 9 Pb 7.01 C. Cu Sn 3 Zn 9 Pb 7.03	90 100	200 201	18 16	500 550	

Slitine bakra s aluminijem (»Aluminijska bronca za lijevanje«)

Sastav

Oznaka	Sastav %			
	Cu	Al	Fe	Ni
Cu Al 9.00	88,0 ... 92,0	8,0 ... 10,5	-	-
Cu Al 10 Fe 3.00	83,0 ... 89,0	8,5 ... 11,0	2,0 ... 5,0	-
Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.00	76	8,5 ... 11,0	3,5 ... 5,5	3,5 ... 6,5

[1] Također K. Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3.02.
[2] Također N. Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3.04.
[3] Također K. Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5,02.
[4] Također N. Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5.04.

Mehanička svojstva i uporaba

Oznaka	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlač. čvrst. R_m N/mm²	Istezljivost A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Uporaba
P. Cu Al 9,01 K. Cu Al 9.02	120 140	320 450	15 15	800 850	otpornost prema koroziji, za prehrehrambenu industriju
P. Cu Al 10 Fe 3.01	180	500	13	1 150	općenito za mehanički opterećene dijelove (pri temper. -200 do +200 °C)
K. Cu Al 10 Fe 3.02 C. Cu Al 10 Fe 3.03 N. Cu Al 10 Fe 3.04	200	550	15	1 150	
P. Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.01	250	600	10	1 400	otpornost prema koroziji i velika čvrstoća, za brodske propelere
K. Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.02	300	600	12	1 500	
C. Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.03 N. Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.04	280	680	12	1 600	

NIKAL I NIKLENE SLITINE

Čisti nikal

Tehnički čisti nikal sadrži:

iznad 99,6 % Ni za kemijske aparate (osobito za platiranje)
iznad 98,7 % Ni za anode
iznad 98,0 % Ni za opću uporabu (i za slitine).

Mehanička svojstva

Slitina	Stanje	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Istezljivost A_5 %	Tvrdoća HB
98,0 % Ni	meko tvrdo	400 ... 450 750	30 ... 45 1	80 ... 90 180 ... 200

Niklene slitine za lijevanje (DIN 17730 – 1971)

Sastav

Oznaka DIN	Sastav % Ni	Cu	Fe	Mn	Si	ostalo
G-Ni 95	> 95					– [1]
G-Ni 93 C	> 93				5,5 ... 6,5	1,0 ... 2,5 C [2]
G-Ni 90 Si	> 90					1,0 C [3]
G-Ni Cu 30 Nb	62 ... 68	26 ... 33	1,0 ... 2,5	0,5 ... 1,5	0,5 ... 1,5	1,0 ... 1,5 Nb [4]
G-Ni Cu 30 Si 3	61 ... 68	27 ... 33	1,0 ... 2,5	0,5 ... 1,5	2,7 ... 3,7	0,5 ... 1,5 Al [4]
G-Ni Cu 30 Si 4	60 ... 68	27 ... 31	1,0 ... 2,5		3,5 ... 45	– [4]

Mehanička svojstva i uporaba

Oznaka	Granica tečenja $R_{p\,0,2\,min}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća $R_{m\,min}$ N/mm²	Istezljivost $A_{5\,min}$ %	Tvrdoća HB_{min}	Uporaba
G-Ni 95	120	320	12	80	dobra otpornost prema koroziji, za armature, aparate i sl.
G-Ni 93 C	160	340	10	85	
G-Ni 90 Si	350	500	3	180	
G-Ni Cu 30 Nb	220	450	25	120	dobra otpornost prema eroziji (i kavitacijskoj), koroziji; velika postojanost u morskoj vodi
G-Ni Cu 30 Si 3	350	650	10	220	
G-Ni Cu 30 Si 4	500	750	1	260	

*

Monel je slitina s približno 66 % Ni, 29 % Cu, 3 % Mn (+ Si, Fe, C), a veoma je otporna koroziji. Rabi se za kondenzatorske cijevi, lopatice vodnih turbina, dijelove kućanskih aparata i sl.

Nečistoće:
[1] 2,0 Si, 1,0 C, 1,2 Cu, 1,0 Fe, 1,5 Mn, 0,01 S, 0,19 ostalo.
[2] 2,0 Si, 1,2 Cu, 1,0 Fe, 1,5 Mn, 0,01 S, 1,19 ostalo.
[3] 1,2 Cu, 1,0 Fe, 1,5 Mn, 0,01 S, 0,19 ostalo.
[4] 1,0 razno.

Niklene slitine za gnječenje
(DIN 17741, 17742, 17743, 17744 – 1983 i 17745 – 1973)

Oznaka DIN	min Ni	Sastav [1] % Mn	Cr	Cu	Mo	Fe	Al	ostalo	Uporaba
Ni 99,4 Fe	99,4					0,4			otporni termometri
Ni Mn 1	98	0,6							kem. aparati, svjećice motora s u.i.
Ni Mn 2	97	2,0							
Ni Mn 3 Al	94	3,0					1,5	1 Si	termoelementi, mrežice za elektronke
Ni Mn 5	94	5,0							
Ni Cr 80 20	76		20					1 Si	otpornici žice za grijala
Ni Cr 70 30	60	1,0	30	0,5		5		2 Si	
Ni Cr 60 15	59		15			21			
Ni Cr 20 Al Si	73	0,7	20			1	3,2	2 Si	otpornici
Ni Cr 15 Fe	72		15			8			vatrostalni dijelovi
Ni Cr 23 Fe	58	1,0	23	0,5		18	1,4	0,5 Ti	
Ni Cr 20 Ti	72	1,0	20	0,5		5		1 Si; 0,4 Ti	
Ni Cr 20 Ti Al	65	1,0	20			1,5	1,4	1 Si; 2,3 Ti	trajno opter. dijelovi, otporni koroziji kaljivo – kemijski aparati
Ni Cu 30 Fe	63			31		1,5			
Ni Cu 30 Al	63			30		1	3,0	0,6 Ti	
Ni Mo 16 Cr 16 Ti	ost.	1,0	16	0,5	16	3		2 Co	dijelovi otporni prema koroziji
Ni Mo 28	ost.	1,0	1	0,5	28	2		1 Co	
Ni Cr 22 Mo 6 Cu	ost.	1,5	22	2	6	20		1 Si: 2 Co	
Ni Cr 22 Mo 7 Cu	ost.	1,0	22	2	7	20		5 Co	
Ni Mo 16 Cr 15 W	ost.	1,0	15	0,5	16	5		2 Co; 4 W	
Ni Cr 22 Mo 9 Nb	ost.	0,5	22	0,5	9	3		1 Co; 4 Nb	
Ni Cr 21 Mo 6 Cu	39	1,0	21	2,5	6	ost.		1 Co	
Ni Cr 21 Mo	38	1,0	21	2,0	3	ost.		1 Co; 0,9 Ti	
Ni Fe 15 Mo	79				4	15			meke magnetske slitine
Ni Fe 16 Cu Cr	76		2	5		16			
Ni Fe 16 Cu Mo	76			5	4	16			
Ni Fe 48 Cr	51		1			47			utaljivanje u mekom staklu
Ni Fe 47 Cr	47	1,0	6			47			
Ni 49	48		1			49			
Ni 48	46					51			
Ni 42	41	1,0				57			
Ni Fe 47	50	0,6				47			
Ni Fe 46	51	0,6				46			
Ni Fe 45	53					45			
Ni Fe 44	53	0,5				44			
Ni Co 29 18	28					54		18 Co	
Ni Co 28 23	27	0,5				48		23 Co	

[1] Srednje i zaokružene vrijednosti.

CINK I CINČANE SLITINE

Čisti cink. Tehnički čisti cink – u pločama (HRN C.E1.020 – 1970)

Oznaka	Sastav %		Uporaba
	Zn_{min}	nečistoće (max)	
Zn 99,995 **Zn 99,99**	99,995 99,99	0,005 0,01	za cinčane slitine za tlačno lijevanje za bakrene slitine s cinkom (i niklom) za duboko izvlačenje
Zn 99,95	99,95	0,05	za galvansko cinčanje, za slitine
Zn 99,5 **Zn 98,5** **Zn 97,5**	99,5 98,5 97,5	0,5 1,5 2,5	za galvansko i toplo cinčanje, slitine s cinkom, cinčano bjelilo itd.

Cinčane slitine za lijevanje (HRN C.J6.040 – 1963 i DIN 1743/2 – 1967)

Oznaka i sastav

Oznaka HRN – DIN	Sastav %				Nečistoće % (max)
	Al	Cu	Mg	Zn	
HRN					
T. Zn Al 4	3,5 ... 4,3	0,0 ... 0,5	0,02 ... 0,06	Ostatak	0,08 Fe 0,005 Cd
T. Zn Al 4 Cu 1	3,5 ... 4,3	0,5 ... 1,2	0,02 ... 0,06		0,007 Pb 0,003 Sn
DIN					
GK 0 Zn Al 4 Cu 3	3,5 ... 4,3	2,5 ... 3,2	0,03 ... 0,06		0,075 Fe 0,009 Pb + Cd
Gk - Zn Al 6 CU 1	5,6 ... 6,0	1,2 ... 1,6	(< 0,005) [1]		0,002 Sn

Mehanička svojstva i uporaba

Oznaka	Granica tečenja $R_{p\,0,2\,min}$ N/mm²	Vlačna čvrst. $R_{m\,min}$ N/mm²	Istezljivost A_{5min} %	Tvrdoća HB_{min}	Uporaba
T. Zn Al 4	200	250	1,5	70	tlačni odljevci točnih izmjera
T. Zn Al 4 Cu 1	220	270	2	80	tlačni odljevci tankih stijenki
G-Zn Al 4 Cu 3	170	220	0,5	90	odljevci u pijesku
GK-Zn Al 4 Cu 3	200	240	1	100	odljevci u kokili
G-Zn Al 6 Cu 1	150	180	1	80	ljevački komplicirani odljevci u pijesku odnosno kokili
Gk-Zn Al 6 Cu 1	170	220	1,5	80	

[1] Kao nečistoća.

OLOVO I OLOVNE SLITINE

Čisto olovo. Rafinirano olovo – u bloku (HRN C.E1.030 – 1978)

Oznaka	Sastav %			Uporaba
	Pb_{min}	Cu	nečistoće (max)	
Pb 99,99	99,99	–	0,01	za optičko staklo, akumulatore
Pb 99,985	99,985	–	0,015	za kemijske aparate
Pb 99,95 Pb 99,9	99,95 99,90	– –	0,05 0,10	za slitine, kabelske obloge
Pb H. 99,9	99,90	0,04 ... 0,10	0,06	za kemijske aparate pri povišenim temperaturama

Slitine olova s kositrom i antimonom

Tiskarske slitine (HRN C.E1.101 – 1966)

Oznaka	Sastav %			Tiskarska oznaka slitine	Uporaba
	Pb	Sn	Sb		
G Pb **Sn 3 Sb 4**	93	3	4	3/4	podloge galvanskih ploča
G Pb **Sn 4 Sb 15**	81	4	15	4/15	za stereo-ploče
G Pb **Sn 5 Sb 12**	83	5	12	5/12	za strojeve linotype
G Pb **Sn 5 Sb 14**	81	5	14	5/14	za stereo-ploče
G Pb **Sn 9 Sb 17**	74	9	17	9/17	za strojeve monotype
D Pb **Sn 30 Sb 6** [1]	64	30	6	30/6	za povećanje žitkosti
D Pb **Sn 5 Sb 28** [1]	67	5	28	5/28	za povećanje tvrdoće

Slitine za obloge električnih kabela (HRN C.E1.040 – 1963)

Oznaka	Sastav %				Uporaba
	Pb	Sn	Sb	Pb	
E Pb 99,9	–	–	–	> 99,90	vrlo meko, za posebne svrhe
E Pb Cu	0,04	–	–	ostatak	vrlo meko, za opću uporabu
E Pb Sb	–	–	0,85		tvrdo, za telefonske kabele
E Pb Sn Sb	–	0,40	0,20		meko, za brodske kabele

Slitine olova s antimonom (HRN C.E1.035 – 1963)

Sastav %		Uporaba
1 ... 5 SB	ost. PB	limovi, trake, cijevi, žice
6 Sb		armature
7 ... 10 Sb		ploče za zaštitu od radioaktivnog zračenja
5,5 Sb 8,8 Sb		za akumulatore

[1] Slitine za dodavanje.

Kositrene i olovne slitine za ležaje (»Bijela kovina«)
(HRN C.E1.100 – 1963)

Oznaka	Sastav %		Tvrdoća HB pri °C 20	50	100	Talište ϑ_t °C	Temperatura lijevanja ϑ_l °C
L. Sn 89	88 ... 90 3 ... 4 7 ... 8	Sn Cu Sb	24,5	19	12	241 ... 354	424 ... 450
L. Sn 80	79 ... 81 8 ... 10 11 ... 12	Sn Cu Sb	27	20	10	230 ... 400	440 ... 460
L. Sn 80 Pb	79 ... 81 5 ... 7 11 ... 13 1 ... 3	Sn Cu Sb Pb	27	20	10	182 ... 400	440 ... 460
L. Pb Sn 9 Cd	8 ... 10 0,5 ... 1,5 13 ... 15 0,75 ... 1,0 0,75 ... 1,0 0,4 ... 0,6 ost.	Sn Cu Sb Cd As Ni Pb	28	23	15	240 ... 400	450 ... 520
L. Pb Sn 6 Cd	5 ... 7 0,5 ... 1,5 14 ... 16 0,75 ... 1,0 0,75 ... 1,0 0,4 ... 0,6 ost.	Sn Cu Sb Cd As Ni Pb	26	21	15	245 ... 420	480 ... 520
L. Pb Sn 10	9,5 ... 10,5 0,5 ... 1,5 14,5 ... 16,5 ost.	Sn Cu Sb Pb	23	16	9	235 ... 370	420 ... 450
L. Pb Sn 5	4,5 ... 5,5 0,5 ... 1,5 14,5 ... 16,5 ost.	Sn Cu Sb Pb	22	13	6	240 ... 420	450 ... 520

Uporaba

L. Sn 89 L. Sn 80	za dinamički teško opterećene ležaje uz povišenu temperaturu
L. Sn 80 Pb	za dinamički teško opterećene ležaje
L. Pb Sn 9 Cd L. Pb Sn 6 Cd	za ležaje dobre klizne sposobnosti pri velikim opterećenjima
L. b Sn 10 L. Pb Sn 5	za ležaje dobre klizne sposobnosti pri umjerenim opterećenjima

LEMOVI

Tvrdi lemovi

Mjedeni lemovi (HRN C.D2.306 – 1957)

Oznaka	Sastav % Cu	Zn_{min}	Si	Temperatura lemljenja ϑ_{lem} °C	Uporaba
S. Cu 85 Zn	84 ... 86	13	0,2 ... 0,4	1 020	za bakar, bakrene slitine, čelik i željezne lijevove
S. Cu 63 Zn	62 ... 64	35	0,2 ... 0,4	910	
S. Cu 60 Zn	59 ... 61	38	0,2 ... 0,4	900	
S. Cu 54 Zn	53 ... 55	44	0,2 ... 0,4	890	za bakrene i niklene slitine i željezne lijevove
S. Cu 48 Zn	47 ... 49	50	–	870	
S. Cu 42 Zn	41 ... 43	56	–	845	za bakrene i niklene slitine

Bakreni lemovi (DIN 8513/1 – 1979)

Oznaka DIN	Sastav % Cu	Sn	Si	Temperatura lemljenja ϑ_{lem} °C	Uporaba
L-Cu	> 99,90	–	–	1 083	za nelegirani čelik
L-Sf Cu	> 99,90	–	0,02 ... 0,05	1 083	
L-Cu Sn 6	> 91	5 ... 8	0 ... 0,4	1 040	za željezne i niklene slitine
L-Cu Sn 12	> 86	11 ... 13	0 ... 0,4	990	

Meki lemovi (HRN C.E1.041 – 1963)

Oznaka	Sastav [1] % Sn	Pb	Najniža temperatura lemljenja ϑ_{lem}/°C	Uporaba
S. Sn 20	20	80	275	za prevlake kovina
S. Sn 25	25	75	257	za strojno lemljenje plamenom
S. Sn 30	30	70	249	
S. Sn 33	33	67	242	za lemljenje razmazivanjem
S. Sn 35	35	65	237	
S. Sn 40	40	60	223	za lemljenje olova
S. Sn 50	50	50	200	za opće svrhe
S. Sn 60	60	40	185	za precizno lemljenje
S. Sn 75	75	25	185	za lemljenje zdravstvenih predmeta

*

Slitine s ekstremno niskim talištem:
Roseova slitina: 50 % Bi, 25 % Pb, 25 % Sn – talište 94 °C.
Woodova slitina: 50 % Bi, 25 % Pb, 12,5 % Sn, 12,5 % Cd – talište 70 °C.

[1] Dopustive nečistoće (max) %: 0,25 Bi; 0,02 Fe; 0,05 As; 0,005 Al; 0,005 Zn.

Srebrni lemovi (HRN C.D2.307 – 1957)

Oznaka	Sastav %					Talište $\frac{\vartheta_t}{°C}$
	Ag	Cu_{max}	Cd	razno (max)	Zn	
S. Cu 55 Zn Ag 8	7 ... 9	55	–	–	ostatak	870
S. Cu 52 Zn Ag 12	11 ... 13	52	–	–	ostatak	830
S. Cu 52 Zn Ag 12 Cd	11 ... 13	52	5 ... 9	–	ostatak	800
S. Cu 49 Zn Ag 15 Cd	14 ... 16	49	8 ... 12	–	ostatak	770
S. Cu 43 Zn Ag 20 Cd	19 ... 21	43	13 ... 17	–	ostatak	750
S. Cu 43 Zn Ag 25	24 ... 26	43	–	–	ostatak	780
S. Cu 42 Zn Ag 25 Cd	24 ... 26	42	12 ... 16	–	ostatak	730
S. Cu 40 Zn Ag 27 Mn	26 ... 28	40	–	10 Mn. 6 Ni	ostatak	840
S. Cu 44 Zn Ag 30 Cd	29 ... 31	44	3 ... 7	–	ostatak	770
S. Cu 36 Zn Ag 30 Cd	29 ... 31	36	10 ... 14	–	ostatak	700
S. Cu 42 Zn Ag 38 Sn	37 ... 39	42	–	4 Sn	ostatak	800
S. Cu 32 An Ag 44	43 ... 45	32	–	–	ostatak	730
S. Cu 19 Zn Ag 45 Cd	44 ... 46	19	18 ... 22	–	ostatak	620
S. Cu 18 Zn Ag 49 Mn	48 ... 50	18	–	8 Mn. 5 Ni	ostatak	690
S. Cu 32 Zn Ag 50 Cd	49 ... 51	32	3 ... 7	–	ostatak	700

Uporaba. Srebrni su lemovi namijenjeni općenito za lemljenje čelika, željeznih lijevova, bakra i bakrenih slitina, a osobito:

S. Cu 52 Zn Ag 12 Cd, S. Cu 49 Zn Ag 15 Cd, S. Cu 43 Zn a Ag 20 Cd – za lemljenje čelika (i platiranih čeličnih limova) s bakrom;

S. Cu 40 Zn Ag 27 Mn – za kemijski otporne čelike i tvrde kovine;
S. Cu 42 Zn Ag 38 Sn – kao lem otporan prema morskoj vodi;
S. Cu 32 Zn Ag 44 – kao vatrostalni lem;
S. Cu 32 Zn Ag 50 Cd – kao lem otporan prema koroziji.

Lemovi za aluminij

Tvrdi lemovi za aluminij (DIN 8513/4 – 1981)

Oznaka DIN	Sastav %		Temperatura lemljenja $\frac{\vartheta_{lem}}{°C}$	Uporaba
	Si	Al		
L-Al Si 7,5	6,8 ... 8,2	ostatak	605 ... 615	Općenito za aluminij (naročito za slitine Al Mn)
L-Al Si 10	9,0 ... 10,5	ostatak	595 ... 605	Općenito za aluminij (naročito za slitine Al Mn)
L-Al Si 12	11,0 ... 13,5	ostatak	590 ... 600	Općenito za aluminij (naročito za slitine Al Mn)

Meki lemovi za aluminij (DIN 1707 – 1981)

Oznaka DIN	Sastav %				Temper. lemljenja $\frac{\vartheta_{lem}}{°C}$	Uporaba
	Sn	Zn	Cd	drugo		
L-Sn Zn 10	85 ... 92	8 ... 15	–	–	200 ... 250	tarni lemovi
L-Sn Zn 40	55 ... 70	30 ... 45	–	–	200 ... 340	
L-Cd Zn 20	–	17 ... 25	75 ... 83	–	265 ... 280	manje osjetljiv prema koroziji lemljenje
L-Zn Al 5	–	94,0 ... 96,0	–	4,0 ... 6,0 Al	380 ... 390	ultrazvukom i u peći

Slitine za električne otpornike (DIN 17471 – 1983)

Oznaka DIN	Sastav %				Električna otpornost [1] $\varrho/(\mu\Omega\ m)$				Uporaba
	Mn	Ni	Al	Cu	20 °C	100 °C	300 °C	500 °C	
Cn Mn 12 Ni [2]	12	2	–	ost.	0,43	0,43	–	–	precizni mjerni otpornici
Cu Ni 20 Mn 10	10	20	–	ost.	0,49	0,49	0,49	–	precizni mjerni otpornici
Cu Ni 44 [3]	1	44	–	ost.	0,49	0,49	0,49	0,49	precizni mjerni otpornici
Cu Mn 2 Al	2	–	0,8	ost.	0,125	0,130	–	–	opći otpornici
Cu Ni 30 Mn	3	30	–	ost.	0,40	0,405	0,417	0,432	opći otpornici
Cu Mn 12 Ni Al	12	5	1,2	ost.	0,50	0,50	0,50	0,50	opći otpornici

Nikelin je slitina sa (%): 55 ... 68 Cu, 31 ... 32 Ni, 0 ... 13 Zn, a ima električnu otpornost 0,40 ... 0,44 μΩ m (= 0,40 ... 0,44 $\Omega\ mm^2/m$).

Slitine za električne žice za visoke temperature (DIN 17470 – 1984)

Oznaka DIN	Sastav %				Električna otpornost [1] $\varrho/\mu\Omega\ m$				Uporaba do °C
	Cr	Ni	Al	Fe	20 °C	400 °C	800 °C	1200 °C	
Ni Cr 80 20 [4]	20	ost.	–	–	1,12	1,15	1,14	1,17	1 200
Ni Cr 60 15 [5]	15	ost.	–	22	1,13	1,20	1,22	1,28	1 150
Ni Cr 30 20 [6]	20	30	–	ost.	1,04	1,17	1,26	–	1 100
Cr Ni 25 20 [7]	25	20	–	ost.	0,95	1,11	1,22	–	1 050
Cr Al 25 5	25	–	5	ost.	1,44	1,45	1,48	1,49	1 300
Cr Al 20 5	20	–	5	ost.	1,37	1,39	1,44	1,45	1 200

Kantal je slitina sa (%): 30 Cr, 5 Al, 3 Co i ost. Fe, a rabi se do 1350 °C.

Slitine posebne električne permeabilnosti

Naziv	Sastav u %					
	Ni	Cu	Mo	Mn	C	Fe
Slitina »1040«	72	14	3	–	< 0,1	11
permalloy A	78,5	–	–	–	–	21,5
permalloy B	48	–	–	–	< 0,1	52
permalloy C	78,5	–	3	0,5	< 0,1	18

1) Stariji naziv: specifični električni otpor i starija jedinica $\Omega\ mm^2/m$ (= μΩ m)
2) »Manganin«.
3) »Konstantan«.
4) »Cekas II«.
5) »Cekas«.
6) »Cekas 0«.
7) »Cekas I«.

Slitine za permenentne magnete

Naziv	Sastav u %						
	Co	Cr	Mo	Ni	Al	razno	Fe
permendur	49	–	–	–	–	2 V	49
koerzit 15 Co 70	16	9	1,6	–	–	–	
koerzit 30 Co 90	31	4,7	0,4	–	–	4,8 Ti	
500 koerzit 120	–	–	–	27,5	13	–	ost.
700 koerzit 160	10	–	–	24,5	11,5	4 Cu	
slitine Mishima: 1)	–	–	–	26	14	+ Cu	
2)	7,5	–	–	27	6	+ Cu	

TITAN I TITANOVE SLITINE

Čisti titan

Titan kristalizira u dva kristalna oblika: ispod temperature pretvorbe 882 °C je Ti_α koji kristalizira heksagonalno, iznad te temperature nastaje Ti_β koji kristalizira u kubnoj prostorno centriranoj rešetki.

Gustoća titana leži između gustoća teških i lakih kovina:

$$Ti_\alpha\,(20\,°C)\quad \varrho = 4505\ kg/m^3 \qquad Ti_\beta\,(900\,°C)\quad \varrho = 4320\ kg/m^3.$$

Tehnički čisti titan (DIN 17850 – 1985)

Oznaka	Sastav (%)					
	Fe_{max}	O ≈	N_{max}	C_{max}	H_{max}	Ti
3.7025	0,20	0,10	0,05	0,08	0,13	
3.7035	0,25	0,20	0,06	0,08	0,13	ostalo
3.7055	0,30	0,25	0,06	0,10	0,13	
3.7065	0,35	0,30	0,07	0,10	0,13	

Mehanička svojstva kovanog titana (DIN 17864 – 1973)

Oznaka	Granica tečenja		Vlačna čvrstoća	Istezljivost		Tvrdoća	Udarna radnja loma	
				uzd.	popr.		uzdužno	poprečno
	$R_{p0,2}$ N/mm²	R_{p1} N/mm²	R_m N/mm²	A_5 %	A_5 %	HB	KU J	KU J
3.7025.10	> 180	> 200	250 ... 410	30	25	120	85	60
2.7035.10	> 250	> 270	390 ... 540	22	20	150	40	35
3.7055.10	> 320	> 350	460 ... 590	28	16	170	35	25
3.7065.10	> 390	> 410	540 ... 740	16	15	200	25	20

Tehnički čisti titan je otporan prema koroziji, postojan u morskoj vodi i morskoj klimi. Uporaba: za kemijske aparate i u zrakoplovstvu.

Titanove slitine (DIN 17851 – 1973)

Oznaka	Sastav (%) [1]				Gustoća ϱ kg/m³
	Al	V	Sn	Ti	
TiAl 6 V 4	5,5 ... 6,75	3,5 ... 4,5	–	ost.	4 450
TiAl 5 Sn 2	4,0 ... 6,0	–	2,0 ... 3,0		4 500

Mehanička svojstva titanovih slitina (DIN 17864)

Oznaka	Modul elast. E N/mm²	Granica tečenja $R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Istezljivost %	Udarna radnja loma KU J	Uporaba ϑ °C
TiAl 6 V 4-F89	111 000	820	890	10	31	do 480
TiAl 5 Sn 2-F79	–	760	790	8	–	do 500

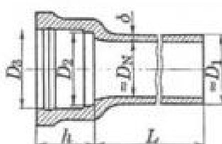
Titanove slitine dobro se zavaruju, otporne su koroziji. Njihova znatna čvrstoća i razmjerno mala gustoća omogućuju konstruiranje najlakših dijelova (zrakoplovstvo, svemirska tehnika).

[1] Dozvoljene nečistoće (%): 0,08 C, 0,30 ... 0,50 Fe, 0,015 ... 0,020 H, 0,05 N, 0,20 O.

OBLICI KOVINSKIH POLUPROIZVODA

ODLJEVCI OD SIVOG LIJEVA
za tlačne cjevovode

Cijevi s kolčakom (HRN C.J1.030 – 1961)



Razred [1]		Nazivni tlak (bar) za D_N (mm) 50, 65	80 ... 1200	Ispitni tlak (bar) za D_N (mm) ... 600	600) ...
LA	c	16	10	20	15
A	c	–	12,5	25	20
	g	12,5	10	20	15
B	c	–	16	30	25
	g	–	12,5	25	20

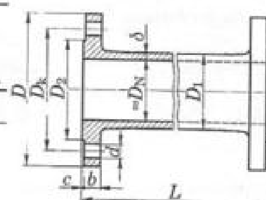
Nazivni promjer D_N mm	D_1 mm	D_2 mm	D_3 mm	h mm	Razredi LA δ mm	A δ mm	B δ mm	Masa kolčaka m kg	Duljinska gustoća cijevi [2] ϱ_l kg/m
50	66	78	84	77	6,7	7,3	–	3,3	8,9
65	82	94	100	80	6,9	7,6	–	4,4	11,6
80	98	110	116	84	7,2	7,9	8,6	5,5	14,7
100	118	131	137	88	7,5	8,3	9,0	7,1	18,6
125	144	157	163	91	7,9	8,7	9,5	9,2	24,2
150	170	183	189	94	8,3	9,2	10,0	11,5	31,1
200	222	235	241	100	9,2	10,1	11,0	16,8	44,0
250	274	287	294	103	10,0	11,0	12,0	22,9	59,3
300	326	339	346	105	10,8	11,9	13,0	29,8	76,5
350	378	391	398	107	11,7	12,8	14,0	37,5	96,3
400	429	442	449	110	12,5	13,8	15,0	46,3	116,9
450	480	494	501	112	13,3	14,7	16,0	56,0	141,0
500	532	546	553	115	14,2	15,6	17,0	66,0	165,2
600	635	650	657	120	15,8	17,4	19,0	89,3	219,8
700	738	753	760	122	17,5	19,3	21,0	116,8	283,2
800	842	857	865	125	19,2	21,1	23,0	147,8	354,9
900	945	960	968	128	20,8	22,9	25,0	182,6	431,8
1 000	1 048	1 064	1 072	130	22,5	24,8	27,0	222,3	518,3
1 100	1 152	1 169	1 177	135	14,2	26,6	29,0	265,6	613,1
1 200	1 256	1 273	1 281	140	25,8	28,4	31,0	313,2	712,9

Nazivni promjeri D_N:	50, 65	80 ... 150	200 ...	mm
Duljine L:	2 i 3	3, 4 i 5	4 i 5	m

[1] c – centrifugalni lijev, g – gravitacijski lijev.
[2] Duljinska gustoća cijevi vrijedi za razred LA. Duljinska gustoća cijevi za razrede A i B su približno za 10 odnosno 20 % veće.

Cijevi s prirubnicom (HRN C.J 1.033 – 1961)

Razred [1]		Nazivni tlak p/bar	Ispitni tlak (bar) za D_N (mm) = ... 300	300) ... 600	600) ...
B	g	12,5	25	20	15



Nazivni promjer D_N mm	D_1 mm	D_2 mm	D mm	b mm	δ mm	Rupe za vijke D_k mm	n [2]	d mm	Masa prirubnice m kg	Duljinska gustoća cijevi ϱ_l kg/m
50	66	98	165	20,5	8,0	125	4	19	2,7	10,4
65	82	118	185	21,0	8,3	145	4	19	3,3	13,7
80	98	133	200	21,0	8,6	160	4	19	3,7	17,3
100	118	153	220	22,0	9,0	180	8	19	4,2	22,0
125	144	183	250	22,5	9,5	210	8	19	5,3	28,7
150	170	209	285	23,0	10,0	240	8	23	6,7	35,9
200	222	264	340	24,5	11,0	295	8	23	9,3	52,1
250	274	319	395	26,0	12,0	350	12	23	12,0	70,6
300	326	367	445	27,5	13,0	400	12	23	14,8	91,4
350	378	427	505	29,0	14,0	460	16	23	19,0	114,5
400	429	477	565	30,0	15,0	515	16	28	23,4	139,5
450	480	528	615	31,5	16,0	565	20	28	26,5	169,0
500	532	582	670	33,0	17,0	620	20	28	32,1	196,7
600	635	682	780	36,0	19,0	725	20	31	44,0	262,9
700	738	797	895	38,5	21,0	840	24	31	59,9	338,2
800	842	904	1 015	41,5	23,0	950	24	34	80,8	413,1
900	945	1 004	1 115	44,0	25,0	1 050	28	34	94,6	516,6
1 000	1 048	1 111	1 230	47,0	27,0	1 160	28	37	120,0	619,2
1 100	1 152	1 221	1 340	50,0	29,0	1 270	32	37	139,0	731,5
1 200	1 256	1 329	1 455	52,5	31,0	1 380	32	40	173,0	853,0

Vrijednost c na slici iznosi:

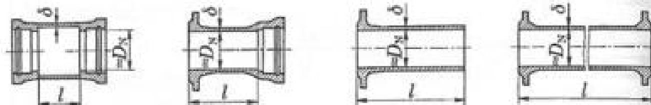
D_N =	50 ... 250	300 ... 500	600 ... 1 200	mm
c =	3	4	5	mm

Duljine L iznose za D_N = 50,65 i 80 mm: 1, 2 ili 3 m za sve ostale D_N 1, 2, 3 ili 4 m.

[1] g gravitacijski lijev (u pješčanim kalupima).
[2] n broj rupa.

Fazonski cijevni komadi (HRN C.J1. 040 ... 081 – 1961)

Spojni komadi [1]



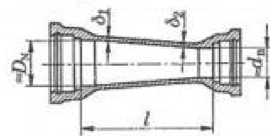
s kolčakom i prirubnicom (HRN C.J1.040)
D_N = 50 ... 1200
δ = 9,3 ... 36,2
l = 150 ... 500

s kolčacima (HRN C.J1.041)
D_N = 50 ... 1200
δ = 10,1 ... 38,0
l = 155 ... 270

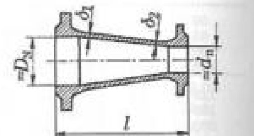
s prirubnicom (HRN C.J1.042)
D_N = 50 ... 1200
δ = 9,3 ... 36,2
l = 400 ... 800

s prirubnicama (HRN C.J1.043)
D_N = 50 ... 1200
δ = 9,3 ... 36,2
l = 100 ... 900

Redukcijski komadi [1]

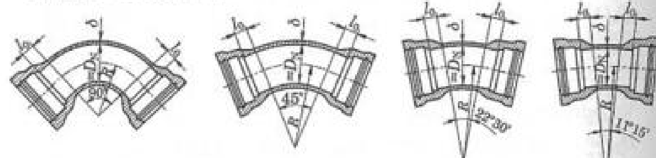


s kolčacima (HRN C.J1.050)
D_N = 65 ... 1200
d_n = 50 ... 1100
δ_1 = 9,7 ... 36,2
δ_2 = 9,3 ... 33,8
l = 200 ... 600



s prirubnicama (HRN C.J1.051)
D_N = 65 ... 1200
d_n = 50 ... 1100
δ_1 = 9,7 ... 36,2
δ_2 = 9,3 ... 33,8
l = 200 ... 600

Lukovi – s kolčacima [1]



1/4 luk (HRN C.J1.060)
D_N = 50 ... 500
δ = 9,3 ... 19,8
R = 110 ... 515
l_0 = 40 ... 85

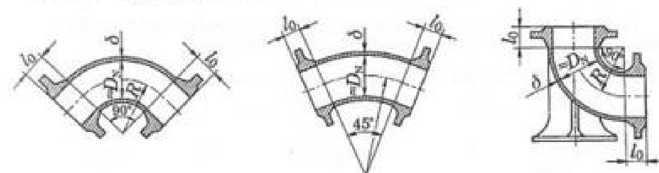
1/8 luk (HRN C.J1.061)
D_N = 50 ... 1200
δ = 9,3 ... 36,2
R = 250 ... 1400
l_0 = 40 ... 155

1/16 luk (HRN C.J1.062)
D_N = 50 ... 1200
δ = 9,3 ... 36,2
R = 250 ... 1400
l_0 = 40 ... 155

1/32 luk HRN C.J1.063)
D_N = 50 ... 1200
δ = 9,3 ... 36,2
R = 250 ... 1400
l_0 = 40 ... 155

[1] Sve su izmjere u mm.

Lukovi – s prirubnicama [1]

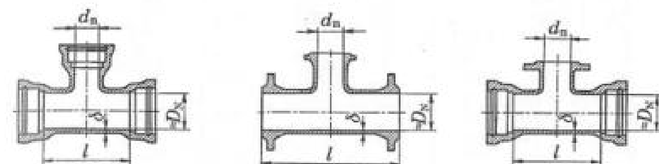


1/4 luk (HRN C.J1.064)
D_N = 50 ... 1200
δ = 9,3 ... 36,2
R = 110 ... 1145
l_0 = 40 ... 155

1/8 luk (HRN C.J1.065)
D_N = 50 ... 1200
δ = 9,3 ... 36,2
R = 266 ... 1400
l_0 = 40 ... 155

luk sa stopalom (HRN C.J1.068)
D_N = 50 ... 600
δ = 9,2 ... 22,2
R = 110 ... 605
l_0 = 40 ... 95

Odvojci [1]

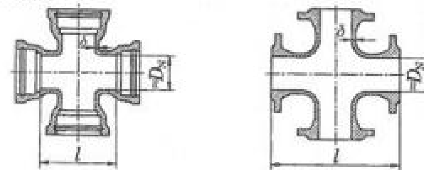


s kolčacima (HRN C.J1.070)
D_N = 50 ... 60
d_n = 50 ... 600
δ = 9,3 ... 22,2
l = 171 ... 940

s prirubnicama (HRN C.J1.071)
D_N = 50 ... 1200
d_n = 50 ... 1200
δ = 9,3 ... 36,2
l = 300 ... 1700

s kolčacima i prirubnicom (HRN C.J1.072)
D_N = 50 ... 1200
d_n = 50 ... 1200
δ = 9,3 ... 36,2
l = 170 ... 1780

Križni komadi [1]



s kolčacima (HRN C.J1.080)
D_N = 50 ... 600
δ = 9,3 ... 22,2
l = 170 ... 940

s prirubnicama (HRN C.J1.081)
D_N = 50 ... 1200
δ = 9,3 ... 36,2
l = 300 ... 1700

[1] Sve su izmjere u mm.

ČELIČNI POLUPROIZVODI

Duljinska i ploštinska gustoća (ϱ_l, ϱ_A) iskazane jedinicama kg/m i kg/m^2 računane su na temelju gustoće čelika ϱ = 7850 kg/m^3.

Čelik u šipkama – vruće valjan:

okrugli (HRN C.B3.021 – 1984)			*kvadratni* (HRN C.B3.024 – 1984)			*šesterokutni* (HRN C.B3.026 – 1984)	
Nazivna debljina d / mm	Duljinska gustoća okrugli ϱ_l / kg/m	Duljinska gustoća kvadr. ϱ_l / kg/m	Nazivna debljine d / mm	Duljinska gustoća okrugli ϱ_l / kg/m	Duljinska gustoća kvadr. ϱ_l / kg/m	Nazivni otvor ključa s / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m
5,5	0,187		40	9,86	12,6	13	1,15
6	0,222		42	10,9		14	1,33
6,5	0,260		44	11,9		15	1,53
7	0,302		45	12,5		16	1,74
7,5	0,347		50	15,4	19,6	18	2,20
8	0,395	0,502	52	16,7		20,5	2,86
10	0,617	0,785	55	18,7		22,5	3,44
12	0,888	1,13	60	22,2	28,3	23,5	3,75
14	1,21	1,54	65	26,0		25,5	4,42
16	1,58	2,01	70	30,2	38,5	28,5	5,52
18	2,00	2,54	75	34,7		31,5	6,74
20	2,47	3,14	80	39,5	50,2	33,5	7,63
22	2,98	3,80	90	49,9		37,5	9,58
24	3,55		100	61,7	78,5	39,5	10,6
25	3,85	4,91	110	74,6		42,5	12,2
27	4,49		120	88,8	113	47,5	15,3
28	4,83	7,07	140	121		52	18,4
30	5,55		150	139		55	20,6
31	5,92	0,04	160	158		57	22,1
32	6,31		180	200		62	26,1
35	7,55	9,62	200	247		62,5	26,5
37	8,44		220	298		67	30,5
38	8,90					72	35,2
						78	41,4
						83	46,8
						88	52,6
						93	58,8
						98	65,3
						103	72,1

Navedeni su samo čelici debljine skupine A koji se obično rabe. (Za čelike debljine skupine B koji se rabe samo iznimno vidi gore navedenu normu!)

Okrugli betonski čelik (HRN C.K6.020 – 1955)

Promjeri: **5**, 6, 7, 8, **10**, 12, **14**, 16, 18, **20**, 22, 25, **28**, 30, 32, 36, **40**.

Preporučuje se uporaba deblje tiskanih promjera.

Vučeni čelici u šipkama

Okrugli vučeni čelici – vučeni u tolerancijskom polju ISO h 11 (HRN C.B3.411 – 1984) i ISO h 9 (HRN C.B3.412 – 1984)

Promjer d / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m	Promjer d / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m	Promjer d / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m	Promjer d / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m
10	0,617	21	2,72	38	8,90	75	34,7
10,5	0,680	22	2,98	39	9,38	80	39,5
11	0,746	23	3,26	40	9,86	85	44,5
11,5	0,815	24	3,55	42	10,9	90	49,9
12	0,888	25	3,85	44	11,9	95 [1)]	55,6
12,5	0,963	26	4,17	45	12,5	100	61,7
13	1,04	27	4,49	46	13,0	110	74,6
13,5	1,12	28	4,83	48	14,2	120	88,8
14	1,21	30	5,55	50	15,4	125	96,3
14,5	1,30	31	5,92	52	16,7	130	104
15	1,39	32	6,31	55	18,7	140	121
16	1,58	33	6,71	58	20,7	150	139
17	1,78	34	7,13	60	22,2	160	158
18	2,00	35	7,55	63	24,5	180	200
19	2,23	36	7,99	65	26,0	200	247
20	2,47	37	8,44	70	30,2		

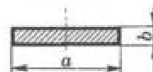
Kvadratni vučeni čelici – vučeni u tolerancijskom polju ISO h 11 (HRN C.B3.421 – 1986)

Debljina a / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m	Debljina a / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m	Debljina a / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m	Debljina a / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m
2	0,031 4	10	0,785	22	3,80	50	19,6
3	0,070 7	11	0,950	(24)	4,52	(55)	23,7
3,5	0,096 2	12	1,13	25	4,91	(60)	28,3
4	0,126	13	1,33	(27)	5,72	63	31,2
4,5	0,159	14	1,54	28	6,15	(65)	33,2
5	0,196	(15) [2)]	1,77	(30)	7,07	70	38,5
5,5	0,237	16	2,01	32	8,04	(75)	44,2
6	0,283	(17)	2,27	(35)	9,62	80	50,2
7	0,385	18	2,54	36	10,2	100	78,5
8	0,502	(19)	2,83	40	12,6		
9	0,636	20	3,14	45	15,9		

Šesterokutni vučeni čelici – vučeni u tolerancijskom polju ISO h 11 (HRN C.B3.441 – 1984)

1) Normirano samo u tolerancijskom području ISO h 11.

2) Izmjere u zagradama rabe se jedino u iznimnim slučajevima.



Vruće valjan plosnati čelik (HRN C.B3.025 - 1984)
Debljine 5 ... 14 mm

Širina a mm	Duljinska gustoća ϱ_l/(kg/mm) za debljinu b mm									
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10	0,393	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	0,471	0,565	-	-	-	-	-	-	-	-
14	0,550	0,659	0,769	0,879	-	-	-	-	-	-
15	0,589	0,707	0,824	0,942	-	1,18	-	-	-	-
16	0,628	0,754	0,879	1,00	1,13	1,26	1,38	-	-	-
18	0,707	0,848	-	1,13	1,27	1,41	-	-	-	-
20	**0,785**	**0,942**	1,10	**1,26**	1,41	**1,57**	-	1,88	2,04	-
22	0,864	1,04	1,21	1,38	-	1,73	1,90	2,07	2,25	2,42
25	**0,981**	**1,18**	1,37	**1,57**	-	**1,96**	-	**2,36**	2,55	2,75
26	1,02	1,22	1,43	1,63	-	2,04	-	2,45	2,65	2,86
28	1,10	1,32	1,54	1,76	-	2,20	-	2,64	2,86	3,08
30	**1,18**	**1,41**	1,65	**1,88**	2,12	**2,36**	-	**2,83**	3,06	3,30
32	1,26	1,51	-	2,01	-	2,51	-	3,01	3,27	3,52
35	**1,37**	**1,65**	1,92	**2,20**	2,47	**2,75**	-	**3,30**	3,57	3,85
38	1,49	1,79	-	2,39	-	2,98	-	3,58	3,88	4,18
40	**1,57**	**1,88**	2,20	**2,51**	2,83	**3,14**	-	**3,77**	4,08	4,40
45	**1,77**	**2,12**	2,47	**2,83**	-	**3,53**	-	**4,24**	4,59	4,95
50	**1,96**	**2,36**	2,75	**3,14**	3,53	**3,93**	-	**4,71**	5,10	5,50
55	2,16	2,59	-	3,45	-	4,32	-	5,18	5,61	6,04
60	**2,36**	**2,83**	3,30	**3,77**	4,24	**4,71**	-	**5,65**	6,12	7,14
65	2,55	3,06	-	4,08	4,59	5,10	-	6,12	6,63	-
70	**2,75**	**3,30**	3,85	**4,40**	-	**5,50**	-	**6,59**	7,14	-
75	2,94	3,53	-	4,71	-	5,89	-	7,07	7,65	-
80	**3,14**	**3,77**	4,40	**5,02**	-	**6,28**	6,91	**7,54**	8,16	-
90	3,53	**4,24**	4,95	**5,65**	6,36	**7,07**	7,77	**8,48**	9,18	-
100	**3,93**	**4,71**	5,50	**6,28**	-	**7,85**	8,64	**9,42**	10,2	11,0
110	-	-	-	6,91	7,77	8,64	9,50	10,4	11,2	12,1
120	-	-	-	**7,54**	8,48	**9,42**	10,4	**11,3**	12,2	-
130	-	-	-	8,16	9,18	10,2	11,2	12,2	13,3	14,3
140	-	-	-	8,79	9,89	11,0	-	13,2	-	-
150	-	-	-	**9,42**	-	11,8	13,0	**14,1**	15,3	16,5

Deblje otisnute brojčane vrijednosti vrijede za uobičajene izmjere; ostale su iznimne. Duljina plosnatog čelika: normalne: 3 ... 4 m, najveće: 12 m.

Vruće valjani plosnati čelik (HRN C.B3.025 - 1984)
Debljine 15 ... 50 mm

Širina a mm	Duljinska gustoća ϱ_l/(kg/mm) za debljinu b mm									
	15	16	17	18	20	25	30	35	40	50
20	2,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	2,59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	2,94	3,14	-	-	-	-	-	-	-	-
26	3,06	3,27	-	3,67	-	-	-	-	-	-
28	-	3,52	-	3,96	-	-	-	-	-	-
30	**3,53**	3,77	-	4,24	**4,71**	5,89	-	-	-	-
32	3,77	4,02	-	-	5,02	6,28	-	-	-	-
35	**4,12**	4,40	-	4,95	**5,50**	6,87	-	-	-	-
38	4,47	4,77	-	-	5,97	7,46	-	-	-	-
40	**4,71**	5,02	-	5,65	**6,28**	7,85	9,42	-	-	-
45	**5,30**	5,65	-	-	**7,07**	8,83	10,6	-	-	-
50	**5,89**	6,28	-	7,07	**7,85**	**9,81**	**11,8**	-	15,7	-
55	6,48	6,91	-	7,77	8,64	10,8	13,0	-	-	-
60	**7,07**	7,54	-	8,48	**9,42**	**11,8**	**14,1**	16,5	18,8	-
65	7,65	8,16	-	9,18	10,2	12,8	15,3	-	20,4	-
70	**8,24**	8,79	-	9,89	**11,0**	**13,7**	**16,5**	19,2	22,0	27,5
75	8,83	9,42	10,0	-	11,8	14,7	17,7	20,6	23,6	-
80	**9,42**	10,0	10,6	-	**12,6**	**15,7**	**18,8**	22,0	**25,1**	31,4
90	**10,6**	11,3	12,0	12,7	**14,1**	17,7	**21,2**	-	**28,3**	35,3
100	**11,8**	12,3	13,3	14,1	15,7	**19,6**	**23,6**	-	**31,4**	39,3
110	13,0	13,8	14,7	15,5	17,3	21,6	25,9	-	34,5	43,2
120	**14,1**	15,1	16,0	17,0	**18,8**	**23,6**	**28,3**	-	**37,7**	**47,1**
130	15,3	16,3	-	18,4	20,4	25,5	30,6	-	40,8	51,0
140	16,5	17,6	-	-	22,0	27,5	33,0	-	44,0	55,0
150	**17,7**	18,8	-	-	**23,6**	**29,4**	**35,3**	-	**47,1**	**58,9**

Duljina plosnatog čelika: normalna 3 ... 4 m, maksimalna 12 m.

Široki plosnati čelik – lamele, vruće valjan (HRN C.B3.030 – 1986):
širina a 150... 1 250 mm, debljina b 40 ... 80 mm, duljina l 2 ... 12 m.

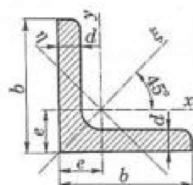
Plosnati čelik s rebrom – lisnate opruge, vruće valjan (HRN C.B3.031 – 1966):
širina a 60 ... 120 mm, debljine b 10 ... 16 mm.

Vučeni plosnati čelik (HRN C.B3.431 – 1986):
širina a 5 ... 50 mm, debljina b 1,5 ... 50 mm.

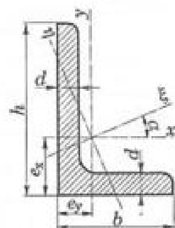
Hladno valjane čelične trake (HRN C.B3.530 – 1967):
širina a do 600 mm, debljine b 0,08 ... 5,0 mm.

Trakasti (obručni) čelik, vruće valjan (HRN C.B3.550 – 1960):
širina a 10 ... 190 mm, debljine b 1 ... 5 mm.

Čelični kutni profili – vruće valjani



Istokračni kutni profili
(HRN C.B3.101 – 1962)



Raznokračni kutni profili
(HRN C.B3.111 – 1962)

Geometrijske karakteristike presjeka nosača:

I moment presjeka
W moment otpora
i polumjer tromosti

Konstrukcijske izmjere – v. str. 487!

Istokračni kutni profili

Oznaka	Presjek	Duljinska gustoća	Geometrijska značajka presjeka nosača					
				$I_x = I_y$		$W_x = W_y$		
$b \times b \times d$ mm	S / mm²	ϱ_l / kg/m	e / mm	I_x / cm⁴	I_η / cm⁴	W_x / cm³	W_η / cm³	i_η / mm
20 × 20 × 3	12	0,88	6,0	0,39	0,15	0,28	0,18	3,7
25 × 25 × 3	142	1,12	7,3	0,79	0,31	0,45	0,30	4,7
25 × 25 × 4	185	1,45	7,6	1,01	0,40	0,58	0,37	4,7
30 × 30 × 3	174	1,36	8,4	1,41	0,57	0,65	0,48	5,7
30 × 30 × 4	227	1,78	8,9	1,81	0,76	0,86	0,61	5,8
30 × 30 × 5	278	2,18	9,2	2,16	0,91	1,04	0,70	5,7
35 × 35 × 4	267	2,10	10,0	2,96	1,24	1,18	0,88	6,8
40 × 40 × 4	308	2,42	11,2	4,48	1,86	1,56	1,18	7,8
40 × 40 × 5	379	2,97	11,6	5,43	2,22	1,91	1,35	7,7
45 × 45 × 5	430	3,38	12,8	7,83	3,25	2,43	1,80	8,7
50 × 50 × 5	480	3,77	14,0	11,0	4,59	3,05	2,32	9,8
50 × 50 × 6	569	4,47	14,5	12,8	5,24	3,61	2,57	9,6
55 × 55 × 6	631	4,95	15,6	17,3	7,24	4,40	3,28	10,7

Istokračni kutni profili (*konac*)

Oznaka	Presjek	Duljinska gustoća	Geometrijska značajka presjeka nosača					
				$I_x = I_y$		$W_x = W_y$		
$b \times b \times d$ mm	S / mm²	ϱ_l / kg/m	e / mm	I_x / cm⁴	I_η / cm⁴	W_x / cm³	W_η / cm³	i_η / mm
60 × 60 × 6	691	5,42	16,9	22,8	9,43	5,29	3,95	11,7
60 × 60 × 8	903	7,09	17,7	29,1	12,1	6,88	4,84	11,6
65 × 65 × 7	870	6,83	18,5	33,4	13,8	7,18	5,27	12,6
70 × 70 × 7	940	7,38	19,7	42,4	17,6	8,43	6,31	13,7
70 × 70 × 9	1 190	9,34	20,5	52,6	22,0	10,6	7,59	13,6
75 × 75 × 8	1 150	9,03	21,3	58,9	24,4	11,0	8,11	14,6
75 × 75 × 10	1 410	11,1	22,1	71,4	29,8	13,5	9,55	14,5
80 × 80 × 8	1 230	9,66	22,6	72,3	29,6	12,6	9,25	15,5
80 × 80 × 10	1 510	11,9	23,4	87,5	35,9	15,5	10,9	15,4
80 × 80 × 12	1 790	14,1	24,1	102	43,0	18,2	12,6	15,3
90 × 90 × 9	1 550	12,2	25,4	116	47,8	18,0	13,3	17,6
90 × 90 × 11	1 870	14,7	26,2	138	57,1	21,6	15,4	17,5
100 × 100 × 10	1 920	15,1	28,2	177	73,3	24,7	18,4	19,5
100 × 100 × 12	2 270	17,8	29,0	207	86,2	29,2	21,0	19,5
110 × 110 × 10	2 120	16,6	30,7	239	98,6	30,1	22,7	21,6
110 × 110 × 12	2 510	19,7	31,5	280	116	35,7	26,1	21,5
120 × 120 × 11	2 540	19,9	33,6	341	140	39,5	29,5	23,5
120 × 120 × 13	2 970	23,3	34,4	394	162	46,0	33,3	23,4
130 × 130 × 12	3 000	23,6	36,4	472	194	50,4	37,7	25,4
130 × 130 × 14	3 470	27,2	37,2	540	223	58,2	42,4	25,3
140 × 140 × 14	3 720	29,2	40,2	692	282	69,3	49,7	27,5
140 × 140 × 16	4 220	33,2	40,9	775	318	78,2	55,0	27,4
150 × 150 × 14	4 030	31,6	42,1	845	347	78,2	58,3	29,4
150 × 150 × 16	4 570	35,9	42,9	949	391	88,7	64,4	29,3
160 × 160 × 15	4 610	36,2	44,9	1 100	453	95,6	71,3	31,4
160 × 160 × 17	5 180	40,7	45,7	1 230	506	108	78,3	31,3
200 × 200 × 16	6 180	48,5	55,2	2 340	943	162	121	39,1
200 × 200 × 18	6 910	54,3	56,0	2 600	1 050	181	133	39,0

Normalne duljine istokračnih kutnih profila: 3 ... 15 m.

Raznokračni kutni profili

Oznaka ∟ $b \times h \times d$ (mm)	Presjek S (mm^2)	Duljinska gustoća ϱ_l (kg/m)	Geometrijska značajka presjeka nosača e_x (mm)	e_y (mm)	I_x (cm^4)	I_y (cm^4)	W_x (cm^3)	W_y (cm^3)
20 × 30 × 3	142	1,11	9,9	5,0	1,25	0,44	0,62	0,29
20 × 30 × 4	185	1,45	10,3	5,4	1,59	0,55	0,81	0,38
20 × 40 × 3	172	1,35	14,3	4,4	2,79	0,47	1,08	0,30
30 × 45 × 4	287	2,25	14,8	7,4	5,78	2,05	1,91	0,91
40 × 60 × 5	479	3,76	19,6	9,7	17,2	6,11	4,25	2,02
40 × 60 × 6	568	4,46	20,0	10,1	20,1	7,12	5,03	2,38
40 × 60 × 7	655	5,14	20,4	10,5	23,0	8,07	5,79	2,74
40 × 80 × 6	689	5,41	28,5	8,8	44,9	7,59	8,73	2,44
50 × 65 × 5	554	4,35	19,9	12,5	23,1	11,9	5,11	3,18
50 × 65 × 7	760	5,97	20,7	13,3	31,0	15,8	6,99	4,31
50 × 100 × 10	1 410	11,1	36,7	12,0	141	23,4	22,2	6,17
55 × 75 × 7	866	6,80	24,0	14,1	47,9	21,8	9,39	5,32
60 × 90 × 6	869	6,82	28,9	14,1	71,7	25,8	11,7	5,61
60 × 90 × 8	1 140	8,96	29,7	14,9	92,5	33,0	15,4	7,31
65 × 80 × 8	1 100	8,66	24,7	17,3	68,1	40,1	12,3	8,41
65 × 100 × 9	1 420	11,1	33,2	15,9	141	46,7	21,0	9,52
65 × 100 × 11	1 710	13,4	34,0	16,7	167	55,1	25,3	11,4
65 × 130 × 10	1 860	14,6	46,5	14,5	321	54,2	38,4	10,7
75 × 130 × 8	1 590	12,5	43,6	16,5	276	68,3	31,9	11,7
80 × 120 × 8	1 550	12,2	38,3	18,7	226	80,8	27,6	13,2
80 × 120 × 10	1 910	15,0	39,2	19,5	276	98,1	34,1	16,2
80 × 120 × 12	2 270	17,8	40,0	20,3	323	114	40,4	19,1
90 × 130 × 10	2 120	16,6	41,5	21,8	358	141	40,5	20,6
90 × 130 × 12	2 510	19,7	42,4	22,6	420	165	48,0	24,4
100 × 150 × 10	2 420	19,0	48,0	23,4	552	198	54,1	25,8
100 × 150 × 12	2 870	22,6	48,9	24,2	650	232	64,2	30,6
100 × 200 × 12	3 480	27,3	70,3	21,0	1 440	247	111	31,3
100 × 200 × 14	4 030	31,6	71,2	21,8	1 650	282	128	36,1

Normalne duljine raznokračnih kutnih profila: 3 ... 15 m.

Čelični profili - vruće valjani (HRN C.B3.141 - 1962)

Geometrijske značajke presjeka nosača:

I moment presjeka

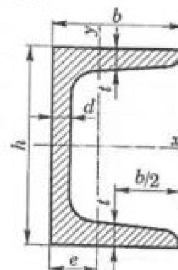
W moment otpora

Polumjer tromosti:

$$i_x = \sqrt{I_x / A}$$

$$i_y = \sqrt{I_y / A}$$

Konstrukcijske izmjere - v. str. 487!

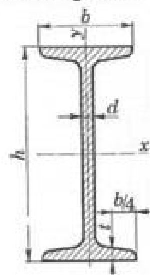


Oznaka[1] ⊏	h (mm)	b (mm)	d (mm)	t (mm)	Presjek S (mm^2)	Duljinska gustoća ϱ_l (kg/m)	Geometrijske značajke presjeka nosača e (mm)	I_x (cm^4)	I_y (cm^4)	W_x (cm^3)	W_y (cm^3)
6,5	65	42	5,5	7,5	903	7,09	14,2	57,5	14,1	17,7	5,07
8	80	45	6	8	1 100	8,64	14,5	106	19,4	26,5	6,36
10	100	50	6	8,5	1 350	10,6	15,5	206	29,3	41,2	8,49
12	120	55	7	9	1 700	13,4	16,0	364	43,2	60,7	11,1
14	140	60	7	10	2 040	16,0	17,5	605	62,7	86,4	14,8
16	160	65	7,5	10,5	2 400	18,8	18,4	925	85,3	116	18,3
18	180	70	8	11	2 800	22,0	19,2	1 350	114	150	22,4
20	200	75	8,5	11,5	3 220	25,3	20,1	1 910	148	191	27,0
(22)	220	80	9	12,5	3 740	29,4	21,4	2 690	197	245	33,6
24	240	85	9,5	13	4 230	33,2	22,3	3 600	248	300	39,6
26	260	90	10	14	4 830	37,9	23,6	4 820	317	371	47,7
(28)	280	95	10	15	5 330	41,8	25,3	6 280	399	448	57,2
30	300	100	10	16	5 880	46,2	27,0	8 030	495	535	67,8

Normalne duljine čeličnih profila ⊏ : 4 ... 15 m.

[1] Izmjere u zagradama treba izbjegavati.

Čelični profili – vruće valjani (HRN C.B3.131 – 1962)



Geometrijske značajke presjeka nosača:

I moment presjeka

W moment otpora

Polumjer tromosti:

$$i_x = \sqrt{I_x/A}$$

$$i_y = \sqrt{I_y/A}$$

Konstrukcijske izmjere – v. str. 487!

Oznaka[1]	Izmjere				Presjek	Duljinska gustoća	Geometrijske karakteristike presjeka nosača			
I	h / mm	b / mm	d / mm	t / mm	S / mm²	ϱ_l / kg/m	I_x / cm⁴	I_y / cm⁴	W_x / cm³	W_y / cm³
8	80	42	3,9	5,9	758	5,95	77,8	6,3	19,5	3,00
10	100	50	4,5	6,8	1 060	8,32	171	12,2	34,2	4,88
12	120	58	5,1	7,7	1 420	11,2	328	21,5	54,7	7,41
14	140	66	4,7	8,6	1 830	14,4	573	35,2	81,9	10,7
16	160	74	6,3	9,5	2 280	17,9	935	54,7	117	14,8
18	180	82	6,9	10,4	2 790	21,9	1 450	81,3	161	19,8
20	200	90	7,5	11,3	3 350	26,3	2 140	117	214	26,0
(22)	220	98	8,1	12,2	3 960	31,1	3 060	162	278	33,1
24	240	106	8,7	13,1	4 610	38,2	4 250	221	354	41,7
26	260	113	9,4	14,1	5 340	41,9	5 740	288	442	51,0
(28)	280	119	10,1	15,2	6 110	48,0	7 590	364	543	61,2
30	300	125	10,8	16,2	6 910	54,2	9 800	451	653	72,2
(32)	320	131	11,5	17,3	7 780	61,1	12 510	555	782	84,7
34	340	137	12,2	18,3	8 680	68,1	15 700	674	923	98,4
(36)	360	143	13,0	19,5	9 710	76,2	19 610	818	090	114
(38)	380	149	13,7	20,5	10 700	84,0	24 010	975	250	131
40	400	155	14,4	21,6	11 800	92,6	29 210	1 160	1 460	149

Normalne duljine čeličnih profila I : 4 ... 15 m.

[1] Izmjere u zagradama treba izbjegavati.

Konstrukcijske izmjere čeličnih profila (DIN 997)

Čelični kutni profili └ └──

$b = h$ / mm	c_1 / mm	c_2 / mm	$d_{0\,max}$ / mm	$b = h$ / mm	c_1 / mm	c_2 / mm	$d_{0\,max}$ / mm
20	12	–	4,3	75	40	–	23
25	15	–	6,4	80	45	–	23
30	17	–	8,4	90	50	–	25
35	18	–	11	100	45	60	25
40	22	–	11	110	45	70	25
45	25	–	13	120	50	80	25
50	30	–	13	130	50	90	25
55	30	–	17	140	50	95	28
60	35	–	17	150	50	105	28
65	35	–	21	160	60	115	28
70	40	–	21	200	60	150	28

Čelični profili [

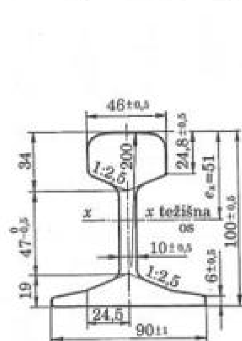
b / mm	c / mm	$d_{0\,max}$ / mm	h_1 / mm	b / mm	c / mm	$d_{0\,max}$ / mm	h_1 / mm
42	25	11	33	75	40	23	151
45	25	13	46	80	45	23	167
50	30	13	64	85	45	25	184
55	30	17	82	90	50	25	200
60	35	17	98	95	50	25	216
65	35	21	115	100	55	25	222
70	40	21	133				

Čelični profili I

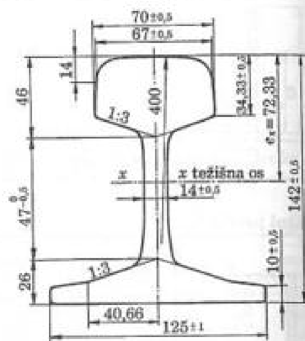
b / mm	c / mm	$d_{0\,max}$ / mm	h_1 / mm	b / mm	c / mm	$d_{0\,max}$ / mm	h_1 / mm
42	22	6,4	59	113	60	17	208
50	28	6,4	75	119	62	17	225
58	32	8,4	92	125	64	21	241
66	34	11	109	131	70	21	258
74	40	11	125	137	74	21	274
82	44	13	142	143	76	23	290
90	48	13	159	149	82	23	306
98	52	13	176	155	86	23	323
106	56	17	192				

Željezničke tračnice (duljinske gustoće ϱ_l veće od 20 kg/m) (HRN C.K1.021 – 1963)

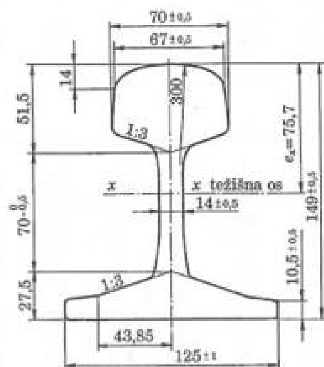
Oznaka tračnice	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{\text{kg/m}}$	Presjek $\frac{S}{\text{mm}^2}$	Moment presjeka $\frac{I_x}{\text{cm}^2}$	Moment otpora $\frac{W_x}{\text{cm}^3}$
22	22,12	2 818	375,5	73,6
45	45,44	5 784	1 552	215
49	49,43	6 297	1 819	240



Oznaka 22



Oznaka 45



Oznaka 49

Čelični limovi

Čelični debeli limovi (HRN C.B4.110 – 1972)

Debljina $\frac{\delta}{\text{mm}}$	Debljina u razmacima od	Širina mm 400) ... 700	Širina mm 700) ... 1500	Širina mm 15000) ... 3000	Duljina mm ... 6000	Duljina mm 6000 ...)
5 ... 7	0,5 mm	u skokovima po 20 mm	u skokovima po 50 mm	u skokovima po 100 mm	u skokovima po 500 mm	u skokovima po 1000 mm
7) ... 30	1 mm					
30) ... 50	2 mm	u skokovima po 50 mm	u skokovima po 100 mm			
50) ... 60	3 mm					
60) ...	5 mm					

Čelični limovi srednje debljine (HRN C.B4.111 – 1956)

Debljina: 3, 3,5 4, 4,5 4,75 mm
Širina: ... 1200 ... 1450 ... 1700 mm
Duljina: ... 4000 ... 5000 ... 6000 ... 7000 mm
Trgovački formati: 1000 × 2000 mm 1250 × 2500 mm

Čelični tanki limovi (HRN C.B4.112 – 1962 i 113 – 1978)

Debljina: 0,4 ... 0,8 mm u razmaku po 0,05 mm
0,9 ... 1,1 mm u razmaku po 0,1 mm
1,25 ... 2,75 mm u razmaku po 0,25 mm
Širina: 550 ... 600, 750 ... 1000, 1100, 1200 mm
Duljina: 1500 ... 2000, 2250, 2500, 3000 mm

Plošna masa čeličnih limova

Debljina $\frac{\delta}{\text{mm}}$	Plošna gustoća $\frac{\varrho_A}{\text{kg/m}^2}$	Debljina $\frac{\delta}{\text{mm}}$	Plošna gustoća $\frac{\varrho_A}{\text{kg/m}^2}$	Debljina $\frac{\delta}{\text{mm}}$	Plošna gustoća $\frac{\varrho_A}{\text{kg/m}^2}$	Debljina $\frac{\delta}{\text{mm}}$	Plošna gustoća $\frac{\varrho_A}{\text{kg/m}^2}$
0,40	3,14	2,00	15,70	9	70,65	25	196,2
0,45	3,53	2,25	17,66	10	78,50	26	204,1
0,50	3,93	2,50	19,63	11	86,35	27	211,9
0,55	4,32	2,75	21,59	12	94,20	28	219,8
0,60	4,71	3,00	23,55	13	102,0	29	227,6
0,65	5,10	3,25	25,51	14	109,9	30	235,5
0,70	5,50	3,50	27,48	15	117,8	32	251,2
0,75	5,89	4,0	31,40	16	125,6	34	266,9
0,80	6,28	4,5	35,32	17	133,4	36	282,6
0,85	6,67	5,0	39,25	18	141,3	38	298,3
0,90	7,07	5,5	43,18	19	149,2	40	314,0
0,95	7,46	6,0	47,10	20	157,0	42	329,7
1,00	7,85	6,5	51,03	21	164,8	44	345,4
1,25	9,81	7,0	54,95	22	172,7	46	361,1
1,50	11,78	7,5	58,88	23	180,6	48	376,8
1,75	13,74	8,0	62,80	24	188,4	50	392,5

Pocinčani lim (HRN C.B4.081 – 1984)

Debljina 0,45 ... 4 mm; širina 1000 mm; duljina 2000 (2500) mm.

Čelične bešavne cijevi (ISO)
Č 0000 (HRN C.B5.226 – 1968)
Č 1212 (HRN C.B5.122 – 1968)
Č 1213 (HRN C.B5.123 – 1968)
Č 1402 (HRN C.B5.124 – 1968)
Č 3100 (HRN C.B5.125 – 1968)

Nazivni promjer D_N/mm	Vanjski promjer D/mm	Debljina stijenke δ/mm	Duljinska gustoća ϱ_l/kg/m	Nazivni tlak p/bar Č 0000	Č 1212	Č 1213	Č 1402	Č 3100
10	16	1,8	0,632	25	100	100	100	100
	17,2	1,8	0,688	25	100	100	100	100
15	20	2,0	0,890	25	100	100	100	100
	21,3	2,0	0,962	25	100	100	100	100
20	25	2,0	1,13	25	100	100	100	100
	26,9	2,3	1,41	25	100	100	100	100
25	30	2,6	1,77	25	100	100	100	100
	33,7	2,6	2,01	25	100	100	100	100
32	38	2,6	2,29	25	100	100	100	100
	42,4	2,6	2,57	25	100	100	100	100
40	44,5	2,6	2,70	25	100	100	100	100
	48,3	2,6	2,95	25	100	100	100	100
50	57	2,9	3,90	25	100	100	100	100
	60,3	2,9	4,14	25	100	100	100	100
65	76,1	2,9	5,28	25	80	80	100	100
		3,2	5,80	–	–	100	–	–
		3,6	6,49	–	100	–	–	–
80	88,9	3,2	6,81	25	64	80	80	100
		3,6	7,63	–	80	100	100	–
		4,0	8,43	–	100	–	–	–
100	108	3,6	9,33	25	64	80	80	100
		4,0	10,3	–	80	–	100	–
		4,5	11,4	–	–	100	–	–
		5,0	12,7	–	100	–	–	–
	114,3	3,6	9,90	25	40	64	80	100
		4,0	11,0	–	80	80	100	–
		4,5	12,1	–	–	100	–	–
		5,0	13,5	–	100	–	–	–

Čelične bešavne cijevi (*nastavak*)

Nazivni promjer D_N/mm	Vanjski promjer D/mm	Debljina stijenke δ/mm	Duljinska gustoća ϱ_l/kg/m	Nazivni tlak p/bar Č 0000	Č 1212	Č 1213	Č 1402	Č 3100
125	133	4,0	12,8	25	40	40	80	100
		4,5	14,2	–	64	80	–	–
		5,0	15,8	–	80	–	100	–
		5,6	17,6	–	–	100	–	–
		6,3	19,8	–	100	–	–	–
	139,7	4,0	13,5	25	40	40	80	80
		4,5	14,9	–	–	64	–	100
		5,0	16,6	–	80	80	100	–
		5,6	18,5	–	–	100	–	–
		6,3	20,8	–	100	–	–	–
150	159	4,5	17,1	25	40	40	80	80
		5,0	19,0	–	–	64	–	100
		5,6	21,1	–	80	80	100	–
		6,3	23,8	–	–	100	–	–
		7,1	26,6	–	100	–	–	–
	168,3	4,5	18,1	25	40	40	64	80
		5,0	20,1	–	–	–	80	100
		5,6	22,4	–	64	80	–	–
		6,3	25,3	–	80	–	100	–
		7,1	28,3	–	100	100	–	–
(175) [1]	193,7	5,4 ... 8,8	25 ... 40					
200	216 [2]	6,0 [2]	31,1	25	40	40	64	80
		6,3	32,6	–	–	–	80	100
		7,1	36,6	–	64	80	–	–
		8,0	41,0	–	80	–	100	–
		8,8	45,0	–	–	100	–	–
		10,0	50,8	–	100	–	–	–
	219,1	5,9	31,0	25	40	40	64	80
		6,3	33,2	–	–	–	80	100
		7,1	37,2	–	64	80	–	–
		8,0	41,5	–	80	–	100	–
		8,8	45,4	–	–	100	–	–
		10,0	51,6	–	100	–	–	–

[1] Nazivni promjer 175 mm HRN ne preporučuje.
[2] Izmjere nisu prema ISO.

Čelične bešavne cijevi *(nastavak)*

Nazivni promjer $\frac{D_N}{mm}$	Vanjski promjer $\frac{D}{mm}$	Debljina stijenke $\frac{\delta}{mm}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{kg/m}$	Nazivni tlak p/bar Č 0000	Č 1212	Č 1213	Č 1402	Č 3100
250	267	6,3	40,6	25	40	40	40	80
		7,1	45,6	–	–	–	64	–
		8,0	50,9	–	–	64	80	100
		8,8	55,8	–	64	80	–	–
		10,0	63,4	–	80	–	100	–
		11,0	69,7	–	100	100	–	–
	273	6,3	41,6	25	40	40	40	80
		7,1	46,7	–	–	–	64	–
		8,0	52,1	–	–	64	80	100
		8,8	57,1	–	64	80	–	–
		10,0	64,9	–	80	–	100	–
		11,0	71,4	–	–	100	–	–
		12,5	80,9	–	100	–	–	–
300	318 [1]	7,5 [1]	57,4	16	40	40	40	64
		8,0	61,2	–	–	–	–	80
		8,8	67,1	–	–	–	80	–
		10,0	76,0	–	–	80	–	100
		11,0	83,3	–	80	–	100	–
		12,5	94,2	–	–	100	–	–
		14,2	106	–	100	–	–	–
	323,9	7,1	55,6	16	40	40	40	64
		8,0	62,1	–	–	–	–	80
		8,8	68,1	–	–	–	80	–
		10,0	77,4	–	–	80	–	100
		11,0	85,3	–	80	–	100	–
		12,5	96,7	–	–	100	–	–
		14,2	109	–	100	–	–	–
350	355,6	8,0	68,3	16	40	40	40	64
		8,8	74,9	–	–	–	–	80
		10,0	85,2	–	–	–	80	100
		11,0	93,9	–	–	80	–	–
		12,5	107	–	80	–	100	–
		14,2	120	–	–	100	–	–
		16,0	133	–	100	–	–	–
	368	8,0	70,8	16	40	40	40	64
		8,8	77,7	–	–	–	–	80
		10,0	88,3	–	–	–	80	–
		11,0	97,3	–	–	64	–	100
		12,5	110	–	80	80	100	–
		14,2	124	–	–	100	–	–
		16,0	138	–	100	–	–	–

[1] Izmjere nisu prema ISO.

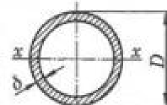
Čelične bešavne cijevi *(konac)*

Nazivni promjer $\frac{D_N}{mm}$	Vanjski promjer $\frac{D}{mm}$	Debljina stijenke $\frac{\delta}{mm}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{kg/m}$	Nazivni tlak p/bar Č 0000	Č 1212	Č 1213	Č 1402	Č 3100
400	406,4	8,8	85,9	16	40	40	40	64
		10,0	97,8	–	–	–	–	80
		11,0	108	–	–	–	80	–
		12,5	122	–	–	80	–	100
		14,2	138	–	80	100	100	–
		17,5	168	–	100	–	–	–
	419	10,0	101	16	40	40	40	80
		11,0	111	–	–	–	64	–
		12,5	126	–	–	64	80	100
		14,2	142	–	80	80	100	–
		16,0	158	–	–	100	–	–
		17,5	173	–	100	–	–	–
500	508	11,0	135	16	40	40	40	40
		12,5	154	–	–	–	–	64
		14,2	173	–	–	–	80	100
		16,0	193	–	64	80	–	–
		17,5	211	–	80	–	100	–
		20,0	241	–	–	100	–	–
		22,2	266	–	100	–	–	–

Od pojedinih vrsta čelika dolaze u obzir cijevi onih izmjera za koje je označen nazivni tlak.

Precizne čelične cijevi – vučene ili hladno valjane

(HRN C.B5.250 – 1983)



Polarni moment presjeka $I_p = 2\,I_x$

Polarni moment otpora $W_p = 2\,W_x$

Vanjski promjer $\frac{D}{mm}$	Debljina stijenke $\frac{\delta}{mm}$	Presjek $\frac{S}{mm^2}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{kg/m}$	Moment presjeka $\frac{I_x}{cm^4}$	Moment otpora $\frac{W_x}{cm^3}$
10	1	28,3	0,222	0,028 98	0,057 96
	1,5	40,0	0,314	0,037 30	0,074 60
12	1	34,5	0,271	0,052 70	0,087 83
	1,5	49,5	0,388	0,069 58	0,116 0
16	1	47,1	0,370	0,133 1	0,166 4
	1,5	68,3	0,536	0,181 5	0,226 9
	2	88,0	0,690	0,219 9	0,274 9
18	1	53,4	0,419	0,193 6	0,215 1
	1,5	77,7	0,610	0,266 8	0,296 3
	2	100,5	0,789	0,326 7	0,363 0

Precizne čelične cijevi – vučene ili hladno valjane (*nastavak*)

Vanjski promjer D / mm	Debljina stijenke δ / mm	Presjek S / mm^2	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m	Moment presjeka I_x / cm^4	Moment otpora W_x / cm^3
20	1	59,7	0,468	0,270 1	0,270 1
	1,5	87,2	0,684	0,375 4	0,375 4
	2	113,1	0,888	0,463 7	0,463 7
	2,5	137,4	1,079	0,536 9	0,536 9
	3	160,2	1,258	0,596 8	0,596 8
22	1	66,0	0,518	0,364 5	0,331 4
	1,5	96,6	0,758	0,510 2	0,463 8
	2	125,7	0.986	0,634 6	0,576 9
	2,5	153,1	1,202	0,730 9	0,672 7
	3	179,1	1,406	0,828 2	0,752 9
25	1	75,4	0,592	0,543 8	0,435 0
	1,5	110,7	0,869	0,767 6	0,614 1
	2	144,5	1,134	0,962 8	0,770 2
	2,5	176,7	1,387	1,132	0,905 6
	3	207,3	1,627	1,278	1,022
28	1	84,8	0,666	0,774 0	0,552 9
	1,5	124,8	0,980	1,100	0,785 7
	2	163,4	1,282	1,389	0,992 1
	2,5	200,3	1,572	1,644	1,174
	3	235,6	1,849	1,867	1,334
30	1	91,1	0,715	0,958 9	0,639 3
	1,5	134,3	1,054	1,367	0,911 3
	2	175,9	1,381	1,733	1,155
	2,5	216,0	1,695	2,059	1,373
	3	254,5	1,997	2,347	1,565
32	1	97,4	0,764	1,171	0,731 9
	1,5	143,7	1,128	1,675	1,047
	2	188,5	1,480	2,130	1,331
	2,5	231,7	1,819	2,538	1,586
	3	273,3	2,145	2,904	1,815
35	1	106,8	0,838	1,545	0,882 9
	1,5	157,9	1,239	2,219	1,268
	2	207,3	1,627	2,833	1,619
	2,5	255,2	2,003	3,390	1,937
	3	301,6	2,367	3,894	2,225
	4	389,5	3,058	4,757	2,718
38	1	116,2	0,912	1,991	1,048
	1,5	172,0	1,350	2,869	1,510
	2	226,2	1,776	3,676	1,935
	2,5	278,8	2,189	4,414	2,323
	3	329,9	2,589	5,088	2,678
	4	427,2	3,354	6,259	3,294
40	1	122,5	0,962	2,331	1,166
	1,5	181,4	1,424	3,367	1,684
	2	238,8	1,874	4,322	2,161
	2,5	294,5	2,312	5,200	2,600
	3	348,7	2,737	6,007	3,004
	4	452,4	3,551	7,419	3,710
45	1,5	205,0	1,609	4,854	2,157
	2	270,2	2,121	6,258	2,781
	2,5	333,8	2,620	7,563	3,361
	3	395,8	3,107	8,773	3,899
	4	515,2	4,044	10,929	4,857

Precizne čelične cijevi – vučene ili hladno valjane (*konac*)

Vanjski promjer D / mm	Debljina stijenke δ / mm	Presjek S / mm^2	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m	Moment presjeka I_x / cm^4	Moment otpora W_x / cm^3
50	1,5	228,5	1,794	6,727	2,691
	2	301,6	2,367	8,701	3,480
	2,5	373,1	2,929	10,551	4,220
	3	443,0	3,477	12,281	4,912
	4	578,0	4,537	15,405	6,162
56	1,5	256,8	2,016	9,543	3,408
	2	339,3	2,663	12,384	4,423
	2,5	420,2	3,298	15,066	5,381
	3	499,5	3,921	17,595	6,284
	4	653,5	5,129	22,217	7,935
63	1,5	289,8	2,275	13,710	4,352
	2	383,3	3,009	17,846	5,665
	2,5	475,2	3,730	21,777	6,913
	3	565,5	4,439	25,510	8,098
	4	741,4	5,820	32,409	10,289
70	1,5	322,8	2,534	18,942	5,412
	2	427,3	3,354	24,717	7,062
	2,5	530,1	4,161	30,235	8,639
	3	631,5	4,957	35,504	10,144
	4	829,4	6,511	45,326	12,950
80	1,5	369,9	2,904	28,505	7,126
	2	490,1	3,847	37,296	9,324
	2,5	608,7	4,778	45,746	11,437
	3	725,7	5,697	53,866	13,467
	4	955,0	7,497	69,145	17,286
90	2	552,9	4,340	53,550	11,900
	2,5	687,2	5,395	65,823	14,627
	3	820,0	6,436	77,670	17,260
	4	1 080,7	8,483	100,127	22,250
100	2	615,8	4,833	73,952	14,790
	2,5	765,8	6,012	91,054	18,211
	3	914,2	7,176	107,624	21,525
	4	1 206,4	9,470	139,215	27,843
110	2	678,6	5,327	98,971	17,995
	2,5	844,3	6,628	122,028	22,187
	3	1 008,5	7,916	144,435	26,261
	4	1 332,0	10,456	187,351	34,064
120	2	741,4	5,820	129,800	21,513
	2,5	922,8	7,244	159,334	26,556
	3	1 102,7	8,656	188,809	31,468
	4	1 457,7	11,443	245,476	40,913

Čelične cijevi za cijevni navoj

Čelične cijevi propisanih mehaničkih svojstava (HRN C.B5.222 - 1968)

Nazivni promjer		Vanjski promjer	Nazivni tlak p/bar) 1 ... 50		80		100	
			debljina stijenke	duljinska gustoća	debljina stijenke	duljinska gustoća	debljina stijenke	duljinska gustoća
D_N / mm	D / col [1]	D / mm	δ / mm	ϱ_l / kg/m	δ / mm	ϱ_l / kg/m	δ / mm	ϱ_l / kg/m
6	1/8	10,2	-	-	-	-	2,65	0,493
8	1/4	13,5	-	-	-	-	2,9	0,769
10	3/8	17,2	-	-	-	-	2,9	1,02
15	1/2	21,3	-	-	-	-	3,25	1,45
20	3/4	26,9	-	-	-	-	3,25	1,9
25	1	33,7	-	-	-	-	4,05	2,97
32	1 1/4	42,4	-	-	-	-	4,05	3,84
40	1 1/2	48,3	-	-	-	-	4,05	4,43
50	2	60,3	-	-	-	-	4,50	6,17
65	2 1/2	76,1	-	-	-	-	4,50	7,90
80	3	88,9	-	-	-	-	4,85	10,1
100	4	114,3			5,4	14,4	6,3	16,8
125	5	139,7	5,4	17,8	7,1	23,3	8,0	25,9
150	6	165,1	5,4	21,2	8,0	30,9	8,8	33,8

Čelične cijevi bez propisanih mehaničih svojstava (HRN C.B5.225 - 1968)

Nazivni promjer		Vanjski promjer	Poluteške cijevi debljina stijenke	Poluteške cijevi duljinska gustoća	Teške cijevi debljina stijenke	Teške cijevi duljinska gustoća
D_N / mm	D / col [1]	D / mm	δ / mm	ϱ_l / kg/m	δ / mm	ϱ_l / kg/m
6	1/8	10,2	2,0	0,407	2,65	0,493
8	1/4	13,5	2,35	0,650	2,9	0,769
10	3/8	17,2	2,35	0,852	2,9	1,02
15	1/2	21,3	2,65	1,22	3,25	1,45
20	3/4	26,9	2,65	1,58	3,25	1,90
25	1	33,7	3,25	2,44	4,05	2,97
32	1 1/4	42,4	3,25	3,14	4,05	3,84
40	1 1/2	48,3	3,25	3,61	4,05	4,43
50	2	60,3	3,65	5,10	4,5	6,17
65	2 1/2	76,1	3,65	6,51	4,5	7,90
80	3	88,9	4,05	8,47	4,85	10,1
100	4	114,3	4,5	12,1	5,4	14,4
125	5	139,7	4,85	16,2	5,4	17,8
150	6	165,1	4,85	19,2	5,4	21,8

[1] Napuštena stara oznaka: 1 col = 1 in = 25,4 mm.

Čelična žica

Okrugla vučena čelična žica (HRN C.B6.110 - 1982)

Nazivni promjer d / mm	Toleran-cija mm	Presjek S / mm²	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m	Nazivni promjer d / mm	Toleran-cija mm	Presjek S / mm²	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m
0,1	± 0,005	0,007 85	0,061 7	1,4	± 0,04	1,54	12,1
0,12		0,011 3	0,088 8	1,6	± 0,06	2,01	15,8
0,14	± 0,01	0,015 4	0,121	1,8		2,54	20,0
0,16		0,020 1	0,158	2		3,14	24,7
0,18		0,025 4	0,200	2,2	± 0,08	3,80	29,8
0,2	± 0,015	0,031 4	0,247	2,5		4,91	38,5
0,22		0,038 0	0,298	2,8		6,16	48,3
0,24		0,045 2	0,355	3,1	± 0,010	7,55	59,2
0,26		0,053 1	0,417	3,4		9,08	71,3
0,28		0,061 6	0,483	3,8		11,3	89
0,31	± 0,02	0,075 5	0,592	4		12,6	99
0,34		0,090 8	0,713	4,2		13,9	109
0,37		0,108	0,844	4,6		16,6	130
0,4		0,126	0,986	5		19,6	154
0,45		0,159	1,25	5,5		23,8	187
0,5		0,196	1,54	6		28,3	222
0,55		0,238	1,87	6,5		33,2	260
0,6		0,283	2,22	7		38,5	302
0,7		0,385	3,02	8		50,3	395
0,8	± 0,03	0,503	3,95	9		63,6	499
0,9		0,636	4,99	10		78,5	617
1		0,785	6,17	11	± 0,15	95	746
1,1		0,950	7,46	12		113	888
1,2		1,13	8,88	13		133	1 040
1,3	± 0,04	1,33	10,4	14		154	1 210

*

Okrugla vučena čelična žica od niskougljičnog čelika za posebne namjene (HRN C.B6.011 - 1980):

Nazivni promjer 0,1 ... 14 mm.

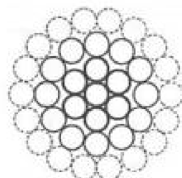
Okrugla čelična žica, vučena ili brušena u tolerancijskom polju ISO h11 (HRN C.B6.111 - 1982):

Nazivni promjer 1 ... 9,8 mm.

17 - Kraut

Čelična užad – za opću uporabu

Čelična užad bez jezgre



Užad bez jezgre (srži) je spletena od žica istog promjera. Oko središnje žice sukano je u prvom sloju 6 ili u drugome 12, ili u trećem 18 žica.

Sukanje prvog sloja može biti *desno* (tj. normalno) ili *lijevo*. Sukanje u sljedećim slojevima uvijek je suprotno sukanju u sloju prije toga.

Žice za užad bez jezgre su od čelika nazivne vlačne čvrstoće

$$R_m = 1570 \text{ ili } 1770 \text{ N/mm}^2.$$

Žice mogu biti gole ili pocinčane.

Uže 1 × 7 (HRN C.H1.060 – 1982)

Uže se sastoji od 7 (1 + 6) žica od kojih je šest ovijeno oko središnje žice.

Nazivni promjer užeta $\frac{d}{\text{mm}}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{\text{kg/m}}$	Prekidna sila F_r – računska, F_{min} – najmanja, pri nazivnoj čvrstoći žica $R_m = 1570$ N/mm² $\frac{F_r}{\text{kN}}$	$R_m = 1570$ N/mm² $\frac{F_{min}}{\text{kN}}$	$R_m = 1770$ N/mm² $\frac{F_r}{\text{kN}}$	$R_m = 1770$ N/mm² $\frac{F_{min}}{\text{kN}}$
0,6	0,001 81	0,342	0,308	0,385	0,347
0,8	0,003 21	0,608	0,547	0,685	0,617
1	0,005 02	0,950	0,855	1,07	0,963
1,5	0,011 3	2,14	1,92	2,41	2,17
2	0,020 1	3,80	3,42	4,28	3,85
2,5	0,031 4	5,93	5,34	6,69	6,02
3	0,045 2	8,55	7,69	9,63	8,67
3,5	0,061 5	11,6	10,5	13,1	11,8
4	0,080 3	15,2	13,7	17,1	15,4
4,5	0,102	19,2	17,3	21,7	19,5
5	0,126	23,7	21,4	26,8	24,1
6	0,181	34,2	30,8	38,5	34,7
7	0,246	46,5	41,9	52,4	47,2
8	0,321	60,8	54,7	68,5	61,7
9	0,407	76,9	69,2	86,7	78,0
10	0,502	95,0	85,5	107	96,3
12	0,723	137	123	154	139
14	0,984	186	167	210	189
16	1,29	243	219	274	247

Uže 1 × 19 (HRN C.H1.061 – 1982)

Uže se sastoji od 19 (1 + 6 + 12) žica od kojih je oko središnje žice ovijeno u prvom sloju 6 žica, a u drugom 12 žica.

Nazivni promjer užeta $\frac{d}{\text{mm}}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{\text{kg/m}}$	Prekidna sila F_r – računska, F_{min} – najmanja, pri nazivnoj čvrstoći žica $R_m = 1570$ N/mm² $\frac{F_r}{\text{kN}}$	$R_m = 1570$ N/mm² $\frac{F_{min}}{\text{kN}}$	$R_m = 1770$ N/mm² $\frac{F_r}{\text{kN}}$	$R_m = 1770$ N/mm² $\frac{F_{min}}{\text{kN}}$
1	0,004 95	0,937	0,825	1,06	0,930
1,5	0,011 1	2,11	1,86	2,38	2,09
2	0,019 8	3,75	3,30	4,23	3,72
2,5	0,031 0	5,86	5,15	6,61	5,81
3	0,044 6	8,43	7,42	9,51	8,37
3,5	0,060 7	11,5	10,1	12,9	11,4
4	0,079 3	15,0	13,2	16,9	14,9
5	0,124	23,4	20,6	26,4	23,2
6	0,178	33,7	29,7	38,1	33,5
7	0,243	45,9	40,4	51,8	45,6
8	0,317	60,0	52,8	67,6	59,5
9	0,401	75,9	66,8	85,6	75,3
10	0,495	93,7	82,5	106	93,0
11	0,599	113	99,8	128	112
12	0,713	135	119	152	134
13	0,837	158	139	179	157
14	0,971	184	162	207	182
15	1,11	211	186	238	209
16	1,27	240	211	271	238
17	1,43	271	238	305	269
18	1,61	304	267	342	301
19	1,79	338	298	382	336
20	1,98	375	330	423	372
21	2,18	413	364	466	410
22	2,40	454	399	512	450
23	2,62	496	436	559	492
24	2,85	540	475	609	536
25	3,10	586	515	661	581

Uže 1 × 37 (HRN C.H1.062 – 1982)

Uže se sastoji od 37 (1 + 6 + 12 + 18) žica od kojih je oko središnje žice ovijeno u prvom sloju 6 žica, u drugom 12 žica i u trećem 18 žica.

Nazivni promjer užeta	Duljinska gustoća	Prekidna sila F_r – računska, F_{min} – najmanja pri nazivnoj čvrstoći žica			
		R_m = 1570 N/mm²		R_m = 1770 N/mm²	
$\frac{d}{mm}$	$\frac{\varrho_l}{kg/m}$	$\frac{F_r}{kN}$	$\frac{F_{min}}{kN}$	$\frac{F_r}{kN}$	$\frac{F_{min}}{kN}$
3	0,044 0	8,32	7,24	9,39	8,16
4	0,078 2	14,8	12,9	16,7	14,5
5	0,122	23,1	20,1	26,1	22,7
6	0,176	33,3	29,0	37,5	32,7
7	0,240	45,3	39,4	51,1	44,4
8	0,313	59,2	51,5	66,8	58,1
9	0,396	74,9	65,2	84,5	73,5
10	0,489	92,5	80,5	104	90,7
12	0,704	133	116	150	131
14	0,958	181	158	204	178
16	1,25	237	206	267	232
18	1,58	300	261	338	294
20	1,96	370	322	417	363
22	2,37	448	389	505	439
24	2,82	533	463	601	522
26	3,31	625	544	705	613
28	3,83	725	631	818	711
30	4,40	832	724	939	816
32	5,01	947	824	1 070	929
34	5,65	1 070	930	1 210	1 050
36	6,34	1 200	1 040	1 350	1 180

*

Čelična užad za uređaje u rudarstvu (HRN C.H1.030/052/055/056 – 1980)

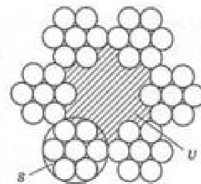
Čelična užad za vitla i slično (HRN C.H1.051 – 1968)

Spojke za čeličnu užad (HRN C.H1.300/301 – 1975)

Uške za čeličnu užad (HRN C.H1.306 – 1983)

Stremenje (HRN C.H4.080 – 1975)

Čelična užad s jezgrom



s – žičani struk
v – vlaknena jezgra

Užad s jezgrom ima 6 žičanih strukova (u izvedbi kao kod užeta bez jezgre, v. str. 498 do 500) sukanih oko vlaknene ili čelične jezgre.[1)]

Sukanje žičanih strukova može biti desno (normalno) ili lijevo.

Prema tome da li je gornji sloj struka sukan desno ili lijevo može uže biti sukano križno (normalno) ili istosmjerno.

Uže 6 × 7 (HRN C.H1.070 – 1982)

Uže se sastoji od 6 strukova po 7 (1 + 6) žica, ovijenih oko vlaknaste jezgre.

Nazivni promjer užeta	Duljinska gustoća	Prekidna sila F_r – računska, F_{min} – najmanja pri nazivnoj čvrstoći žica			
		R_m = 1570 N/mm²		R_m = 1770 N/mm²	
$\frac{d}{mm}$	$\frac{\varrho_l}{kg/m}$	$\frac{F_r}{kN}$	$\frac{F_{min}}{kN}$	$\frac{F_r}{kN}$	$\frac{F_{min}}{kN}$
2	0,014 3	–	–	2,61	2,35
3	0,032 2	–	–	5,88	5,29
4	0,057 2	–	–	10,5	9,41
5	0,089 4	–	–	16,3	14,7
6	0,129	–	–	23,5	21,1
7	0,175	–	–	32,0	28,8
8	0,229	37,1	33,4	41,8	37,6
9	0,289	46,9	42,2	52,9	47,6
10	0,357	58,0	52,2	65,3	58,8
11	0,432	70,1	63,1	79,1	71,1
12	0,515	83,4	75,1	94,1	84,7
13	0,604	79,9	88,1	110	99,4
14	0,701	114	102	128	115
16	0,915	148	134	167	151
18	1,16	188	169	212	191
20	1,43	232	209	261	235
22	1,73	280	252	316	285
24	2,06	334	300	376	339
26	2,42	392	353	442	397
28	2,80	454	409	512	461
32	3,66	593	534	669	602
36	4,63	751	676	847	762
40	5,72	927	835	1 050	941

*

Obično uže 8 × 7 (HRN C.H1.080 – 1982)

1) Kod čelične jezgre su duljinska masa i prekidna sila nešto veće.

Uže 6 × 19 (HRN C.H1.072 – 1982)

Uže se sastoji od 6 strukova po 19 (1 + 6 + 12) žica od kojih je oko središnje žice ovijeno u prvom sloju 6 žica, u drugom 12 žica, a strukovi su ovijeni oko vlaknaste jezgre.

Nazivni promjer užeta	Duljinska gustoća	Prekidna sila F_r – računska, F_{min} – najmanja pri nazivnoj čvrstoći žica			
		R_m = 1570 N/mm²		R_m = 1770 N/mm²	
$\frac{d}{mm}$	$\frac{q_l}{kg/m}$	$\frac{F_r}{kN}$	$\frac{F_{min}}{kN}$	$\frac{F_r}{kN}$	$\frac{F_{min}}{kN}$
3	0,331 1	–	–	5,69	4,90
4	0,055 4	–	–	10,1	8,70
5	0,086 5	–	–	15,8	13,6
6	0,125	–	–	22,8	19,6
7	0,170	–	–	31,0	26,7
8	0,221	35,9	30,9	40,5	34,8
9	0,280	45,4	39,1	51,2	44,1
10	0,346	56,1	48,2	63,3	54,4
11	0,419	67,9	58,4	76,5	65,8
12	0,498	80,8	69,5	91,1	78,3
13	0,585	94,8	81,5	107	91,9
14	0,678	110	94,6	124	107
16	0,886	144	124	162	139
18	1,12	182	156	205	176
20	1,38	224	193	253	218
22	1,67	272	234	306	263
24	1,9	323	278	364	313
26	2,34	379	326	428	368
28	2,71	440	378	496	426
32	3,54	575	494	648	557
36	4,48	727	625	820	705
40	5,54	898	722	1 010	870
44	6,70	1 090	934	1 220	1 050
48	7,97	1 290	1 110	1 460	1 250
52	9,36	1 520	1 300	1 710	1 470
56	10,9	1 760	1 510	1 980	1 710

*

Uže 6 × 19 – ispunjeno žicama (HRN C.H1.086 – 1982)
Uže 8 × 19 – ispunjeno žicama (HRN C.H1.088 – 1982)
Uže Warrington 6 × 19 (HRN C.H1.090 – 1982)
Uže Warrington 8 × 19 (HRN C.H1.096 – 1982)
Uže Seale 7 × 19 (HRN C.H1.100 – 1982)
Uže Seale 8 × 19 (HRN C.H1.104 – 1982)

Uže 6 × 37 (HRN C.H1.074 – 1982)

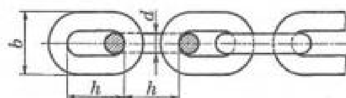
Uže se sastoji od 6 strukova po 37 (1 + 6 + 12 + 18) žica od kojih je oko središnje žice ovijeno u prvom sloju 6 žica, u drugom 12 žica, u trećem 18 žica, a strukovi su ovijeni oko vlaknaste jezgre.

Nazivni promjer užeta	Duljinska gustoća	Prekidna sila F_r – računska, F_{min} – najmanja pri nazivnoj čvrstoći žica			
		R_m = 1570 N/mm²		R_m = 1770 N/mm²	
$\frac{d}{mm}$	$\frac{q_l}{kg/m}$	$\frac{F_r}{kN}$	$\frac{F_{min}}{kN}$	$\frac{F_r}{kN}$	$\frac{F_{min}}{kN}$
6	0,125	–	–	22,8	18,8
7	0,170	–	–	31,0	25,6
8	0,221	35,9	29,6	40,5	33,4
9	0,280	45,4	37,5	51,2	42,3
10	0,346	56,1	46,3	63,3	52,2
11	0,419	67,9	56,0	76,5	63,1
12	0,498	80,8	66,6	91,1	75,1
13	0,585	94,8	78,2	107	88,2
14	0,678	110	90,7	124	102
16	0,886	144	118	162	134
18	1,12	182	150	205	169
20	1,38	224	185	253	209
22	1,67	272	224	306	253
24	1,99	323	267	364	301
26	2,34	379	313	428	353
28	2,71	440	363	496	409
32	3,54	575	474	648	534
36	4,48	727	600	820	676
40	5,54	898	741	1 010	835
44	6,70	1 090	896	1 220	1 010
48	7,97	1 290	1 070	1 460	1 200
52	9,36	1 520	1 250	1 710	1 410
56	10,9	1 760	1 450	1 980	1 640
60	12,5	2 020	1 670	2 280	1 880
64	14,2	2 300	1 900	2 590	2 140

*

Obično uže 8 × 37 (HRN C.H1.084 – 1982)
Uže Seale 6 × 37 (HNR C.H1.102 – 1982)
Uže 6 × 12 + 7 vlaknastih jezgri (HNR C.H1.076 – 1982)
Uže 6 × 24 + 7 vlaknastih jezgri (HNR C.H1.078 – 1982)
Uže Warrington-Seale 6 × 31 (HNR C.H1.106 – 1982)
Uže Warrington-Seale 6 × 36 (HRN C.H1.108 – 1982)
Uže Warrington-Seale 8 × 36 (HRN C.H1.112 – 1982)

Čelični lanci



Lanci za opću uporabu (HRN C.H4.020 – 1978) (kalibrirani)

Nazivni promjer [1]	Korak	Širina članka	Duljinska gustoća	Opterećenje		
				dozvoljeno	ispitno [2]	
					LO, LC	LP
d / mm	h / mm	b / mm	q_l / kg/m	F_{dop} / kN	F_{isp} / kN	F_{isp} / kN
5 [3]	18,5	17	0,500	–	–	–
6 [3]	18,5	20	0,750	–	–	–
4	16	14	0,320	1,47	2,94	–
5	18,5	17	0,500	2,45	4,91	6,18
6	18,5	20	0,750	3,43	6,87	8,83
7	22	23	1,00	4,41	8,83	12,4
8	24	26	1,35	6,18	12,4	15,7
9	27	30	1,80	7,85	15,7	19,6
(9,5)	27	31	1,90	8,34	16,7	–
10	28	34	2,25	9,81	19,6	24,5
(11)	31	36	2,70	11,0	22,0	31,4
13	36	44	3,80	15,7	31,4	41,6
14	41	47	4,40	–	–	49,1
16	45	54	5,80	24,5	49,1	61,8
18	50	60	7,30	30,9	61,8	78,5
20	56	67	9,00	39,2	78,5	98,1
23	64	77	12,0	49,1	98,1	131
26	73	87	15,0	61,8	124	167
28	78	94	17,5	73,6	147	196
30	84	101	20,0	83,4	167	220
33	92	112	24,5	98,1	196	259
36	101	122	29,0	123	245	294
39	109	132	34,0	137	275	353
42	118	142	40,0	167	334	392
45	126	152	45,5	186	373	439
48	134	162	52,0	206	412	491
51	143	172	58,5	245	490	549
54	151	182	65,5	275	549	618
57	160	192	73,0	294	589	657
60	168	202	81,0	329	657	697

[1] Treba izbjegavati nazivne promjene u zagradama.
[2] LO – obični lanci, LC – cementirani lanci, LP – poboljšani lanci.
[3] Samo za ručnu uporabu.

Lanci za dizala (HRN C.H4.021 – 1978) (kalibrirani)

Nazivni promjer [1]	Korak	Širina članka	Duljinska gustoća	Opterećenje	
				dozvoljeno	ispitno
d / mm	h / mm	b / mm	q_l / kg/m	F_{dop} / kN	F_{isp} / kN
13	36	42	3,80	15,7	31,4
16	45	52	5,80	24,5	49,1
18	50	58	7,30	30,9	61,8
20	56	65	9,00	39,2	78,5
23	64	74	12,0	49,1	98,1

Lanci za dizala (HRN C.H4.011/023/024 – 1978) **razred kvalitete: 5, 6, 8**

Nazivni promjer [1]	Korak [1]	Širina članka		Duljinska gustoća
		vanjska	unutarnja	
d / mm	h / mm	b_{max} / mm	$b_{u\,min}$ / mm	q_l / kg/m
4	12	13,7	5	0,35
5	15	16,9	6	0,54
(5)	(18,5)	16,9	6	0,50
6	18	20,2	7,2	0,78
(6)	(18,5)	20,2	7,2	0,77
7	21	23,6	8,4	1,07
(7)	(22)	23,6	8,4	1,05
8	24	27	9,6	1,40
9	27	30,4	10,8	1,75
10	28	34	12	2,25
11	31	37,4	13,2	2,70
13	36	44,2	15,6	3,80
14	41	47,6	16,8	4,40
16	45	54,4	19,2	5,75
18	50	63,0	21,6	7,30

*

Komadni lanci za opću uporabu s kratkim člancima (HRN C.H4.025 – 1978).
Lanci za **transportere s dugim člancima** (HNR C.H4.030 – 1978).
Lanci za **transportere sa srednje dugim člancima** (HNR C.H4.031 – 1978).

[1] Izmjere u zagradama treba izbjegavati.

ALUMINIJSKI POLUPROIZVODI

Duljinska i ploštinska gustoća (ϱ_l, ϱ_A) iskazane jedinicama kg/m i kg/m² računate su na temelju gustoće aluminija ϱ = 2 700 kg/m³.

Aluminijske šipke i žice

Okrugle šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (HRN C.C3.030/031/130/131 – 1963)

Promjer [1] vučeno al, d/mm	vučeno sl, d/mm	prešano al sl, d/mm	Presjek S/mm²	Duljinska gustoća ϱ_l/kg/m	Promjer [1] vučeno al, d/mm	vučeno sl, d/mm	prešano al sl, d/mm	Presjek S/mm²	Duljinska gustoća ϱ_l/kg/m
1	1	–	0,785	0,002 12	20	20	20	314,2	0,848
1,2	–	–	1,131	0,003 05	21	–	–	346,4	0,935
1,4	–	–	1,539	0,004 16	22	–	–	380,1	1,03
1,5	–	–	1,767	0,004 77	23	–	–	415,5	1,12
1,6	–	–	2,011	0,005 43	24	–	–	452,4	1,22
1,8	–	–	2,545	0,006 87	25	25	25	490,9	1,33
2,0	2	–	3,142	0,008 48	26	–	–	530,9	1,43
2,2	–	–	3,801	0,010 3	27	–	–	572,6	1,55
2,5	–	–	4,909	0,013 3	28	–	–	615,8	1,66
2,8	–	–	6,158	0,016 6	29	–	–	660,5	1,78
3,0	–	–	7,069	0,019 1	30	30	30	706,9	1,91
3,2	–	–	8,042	0,021 7	32	32	–	804,2	2,17
3,5	–	–	9,621	0,026 0	34	–	–	907,9	2,45
3,8	–	–	11,34	0,030 6	35	35	35	962,1	2,60
4,0	4	–	12,57	0,033 9	36	–	–	1 018	2,75
4,5	–	–	15,90	0,042 9	38	38	–	1 134	3,06
5,0	5	5	19,63	0,053 0	40	40	40	1 257	3,39
5,5	–	–	23,76	0,064 1	42	42	–	1 385	3,74
6,0	6	6	28,27	0,076 3	45	45	45	1 590	4,29
7,0	–	7	38,48	0,104	48	48	–	1 810	4,89
8,0	8	8	50,27	0,136	50	50	50	1 963	5,30
9,0	–	–	63,62	0,172	52	52	–	2 124	5,73
10	10	10	78,54	0,212	53	–	–	2 206	5,96
11	–	–	95,03	0,257	54	–	–	2 290	6,18
12	12	–	113,1	0,305	55	55	55	2 376	6,41
13	–	–	132,7	0,358	56	–	–	2 463	6,65
14	–	–	153,9	0,416	57	–	–	2 552	6,89
15	15	15	176,7	0,477	58	58	–	2 642	7,13
16	–	–	201,1	0,543	60	60	60	2 827	7,63
17	–	–	227,0	0,613	65	65	65	3 318	8,96
18	–	–	254,5	0,687	70	70	70	3 848	10,4
19	–	–	283,5	0,766	75	75	75	4 418	11,9

[1] Vrijednosti »al« vrijede za aluminijske poluproizvode, a vrijednosti »sl« za poluproizvode od aluminijskih slitina.

Okrugle šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (*konac*)

Promjer [1] vučeno al, d/mm	vučeno sl, d/mm	prešano al sl, d/mm	Presjek S/mm²	Duljinska gustoća ϱ_l/kg/m	Promjer [1] vučeno al sl, d/mm	prešano al sl, d/mm	Presjek S/mm²	Duljinska gustoća ϱ_l/kg/m
80	80	80	5 027	13,6	–	170	22 698	61,3
90	90	90	6 362	17,2	–	180	25 447	68,7
95	–	–	7 088	19,1	–	190	28 353	76,6
100	100	100	7 854	21,2	–	200	31 416	84,8
–	110	110	9 503	25,7	–	210	34 636	93,5
–	120	120	11 310	30,5	–	220	38 013	103
–	–	130	13 272	35,8	–	230	41 548	112
–	–	140	15 394	41,6	–	240	45 239	122
–	–	150	17 672	47,7	–	250	49 087	133
–	–	160	20 106	54,3	–			

Kvadratne šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (HRN C.C3.034/035/134/135 – 1963)

Debljina [1] vučeno al, s/mm	vučeno sl, s/mm	prešano al sl, s/mm	Presjek S/mm²	Duljinska gustoća ϱ_l/kg/m	Debljina [1] vučeno al, s/mm	vučeno sl, s/mm	prešano al sl, s/mm	Presjek S/mm²	Duljinska gustoća ϱ_l/kg/m
2	–	–	4	0,010 8	22	22	–	484	1,31
3	–	–	9	0,024 3	–	24	–	576	1,56
4	4	–	16	0,043 2	25	–	25	625	1,69
–	4,5	–	20,25	0,054 7	–	27	–	729	1,97
5	5	–	25	0,067 5	28	–	–	784	2,12
–	5,5	–	30,25	0,081 7	30	30	30	900	2,43
6	6	6	36	0,097 2	32	–	–	1 024	2,76
7	7	–	49	0,132	35	–	–	1 225	3,31
8	8	8	64	0,173	40	–	40	1 600	4,32
–	9	–	81	0,219	45	–	–	2 025	5,47
10	10	10	100	0,273	50	–	50	2 500	6,75
–	11	–	121	0,327	55	–	–	3 025	8,17
12	12	–	144	0,389	60	–	60	3 600	9,72
–	14	–	196	0,529	65	–	–	4 225	11,4
15	–	15	225	0,608	70	–	70	4 900	13,2
16	–	–	256	0,691	75	–	–	5 625	15,2
–	17	–	289	0,780	–	–	80	6 400	17,3
18	–	–	324	0,875	–	–	100	10 000	27,3
–	19	–	361	0,975	–	–	120	14 400	38,9
20	–	20	400	1,08	–	–	150	22 500	60,8

[1] Vrijednosti »al« vrijede za aluminijske poluproizvode, a vrijednosti »sl« za poluproizvode od aluminijskih slitina.

Šesterokutne šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (HRN C.C3.036/037/136/137 – 1963)

Otvor ključa [1] vučeno al $\frac{b}{mm}$	Otvor ključa [1] vučeno sl	Otvor ključa [1] prešano al sl $\frac{b}{mm}$	Presjek $\frac{S}{mm^2}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{kg/m}$
3	3	–	7,794	0,021 0
3,5	3,5	–	10,61	0,028 6
4	4	–	13,86	0,047 4
4,5	4,5	–	17,54	0,037 3
5	5	–	21,65	0,058 5
5,5	5,5	–	26,20	0,070 7
6	6	6	31,18	0,084 2
7	7	–	42,44	0,115
8	8	8	55,43	0,150
9	9	–	70,15	0,189
10	10	10	86,60	0,234
11	11	–	104,8	0,283
12	12	–	124,7	0,337
13	–	–	146,4	0,394
14	14	–	169,7	0,458
–	–	15	194,8	0,526
17	17	–	250,3	0,676
18	–	–	280,6	0,750
19	19	–	312,6	0,844
20	–	20	346,0	0,934
22	22	–	419,2	1,13
24	24	–	498,8	1,35
25	–	25	541,3	1,46
27	27	–	631,3	1,70
28	–	–	678,9	1,83
30	30	30	779,4	2,10
32	32	–	886,8	2,39
33	–	–	943,0	2,55
35	–	–	1 060	2,86
36	36	–	1 122	3,03
38	–	–	1 250	3,38
–	–	40	1 384	3,74
41	41	–	1 456	3,93
42	–	–	1 527	4,12
45	–	–	1 753	4,73
46	46	–	1 833	4,95
50	50	50	2 165	5,85
55	–	–	2 620	7,07
60	–	60	3 118	8,42
–	–	70	4 243	11,46
–	–	80	5 542	14,96
–	–	100	8 660	23,42
–	–	120	12 470	36,70
–	–	150	19 481	52,60

[1] Vrijednosti »al« vrijede za aluminijske poluproizvode, a vrijednosti »sl« za poluproizvode od aluminijskih slitina.

Plosnate šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (HRN C.C3.200/201 – 1963)

Širina × debljina vučeno mm	Širina × debljina prešano mm	Presjek $\frac{S}{mm^2}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{kg/m}$	Širina × debljina vučeno mm	Širina × debljina prešano mm	Presjek $\frac{S}{mm^2}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{kg/m}$
5 × 2	–	10	0,027	20 × 4	–	80	0,216
5 × 3	–	15	0,041	20 × 5	20 × 5	100	0,270
5 × 4	–	20	0,054	20 × 6	20 × 6	120	0,324
6 × 2	–	12	0,032	20 × 8	20 × 8	160	0,432
6 × 3	–	18	0,049	20 × 10	20 × 10	200	0,540
6 × 4	–	24	0,065	20 × 12	20 × 12	240	0,648
6 × 5	–	30	0,081	20 × 16	–	320	0,864
8 × 2	–	16	0,043	25 × 3	–	75	0,202
8 × 3	–	24	0,065	25 × 4	–	100	0,270
8 × 4	–	32	0,086	25 × 5	25 × 5	125	0,338
8 × 5	8 × 5	40	0,108	25 × 6	25 × 6	150	0,405
8 × 6	8 × 6	48	0,130	25 × 8	25 × 8	200	0,540
10 × 2	–	20	0,054	25 × 10	25 × 10	250	0,675
10 × 3	–	30	0,081	25 × 12	25 × 12	300	0,810
10 × 4	–	40	0,108	25 × 16	25 × 16	400	1,08
10 × 5	10 × 5	50	0,135	25 × 20	–	500	1,35
10 × 6	10 × 6	60	0,162	30 × 4	–	120	0,324
10 × 8	10 × 8	80	0,216	30 × 5	30 × 5	150	0,405
12 × 2	–	24	0,065	30 × 6	30 × 6	180	0,486
12 × 3	–	36	0,097	30 × 8	30 × 8	240	0,648
12 × 4	–	48	0,130	30 × 10	30 × 10	300	0,810
12 × 5	12 × 5	60	0,162	30 × 12	30 × 12	360	0,972
12 × 6	12 × 6	72	0,194	30 × 16	30 × 16	480	1,30
12 × 8	12 × 8	96	0,259	30 × 20	30 × 20	600	1,62
12 × 10	–	120	0,324	30 × 25	–	750	2,03
16 × 2	–	32	0,086	40 × 5	40 × 5	200	0,540
16 × 3	–	48	0,130	40 × 6	40 × 6	240	0,648
16 × 4	–	64	0,173	40 × 8	40 × 8	320	0,864
16 × 5	16 × 5	80	0,216	40 × 10	40 × 10	400	1,08
16 × 6	16 × 6	96	0,259	40 × 12	40 × 12	480	1,30
16 × 8	16 × 8	128	0,346	40 × 16	40 × 16	640	1,73
16 × 10	16 × 10	160	0,432	40 × 20	40 × 20	800	2,16
16 × 12	–	192	0,518	40 × 25	40 × 25	1 000	2,70
20 × 2	–	40	0,108	40 × 30	–	1 200	3,24
20 × 3	–	60	0,162				

Plosnate šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (konac)

Širina × debljina vučeno	Širina × debljina prešano	Presjek	Duljinska gustoća	Širina × debljina vučeno	Širina × debljina prešano	Presjek	Duljinska gustoća
mm	mm	$\frac{S}{mm^2}$	$\frac{\varrho_l}{kg/m}$	mm	mm	$\frac{S}{mm^2}$	$\frac{\varrho_l}{kg/m}$
–	50 × 5	250	0,675	–	100 × 50	5 000	13,50
50 × 6	50 × 6	300	0,810	–	100 × 60	6 000	16,20
50 × 8	50 × 8	400	1,08	–	125 × 10	1 250	3,38
50 × 10	50 × 10	500	1,35	–	125 × 12	1 500	4,05
50 × 12	50 × 12	600	1,62	125 × 16	125 × 16	2 000	5,40
50 × 16	50 × 16	800	2,16	125 × 20	125 × 20	2 500	6,75
50 × 20	50 × 20	1 000	2,70	125 × 25	125 × 25	3 125	8,44
50 × 25	50 × 25	1 250	3,38	125 × 30	125 × 30	3 750	10,13
50 × 30	50 × 30	1 500	4,05	125 × 40	125 × 40	5 000	13,50
50 × 40	–	2 000	5,40	–	125 × 50	6 250	16,87
–	60 × 6	360	0,972	–	125 × 60	7 500	20,25
60 × 8	60 × 8	480	1,30	–	160 × 10	1 600	4,32
60 × 10	60 × 10	600	1,62	–	160 × 12	1 920	5,18
60 × 12	60 × 12	720	1,94	–	160 × 16	2 560	6,91
60 × 16	60 × 16	960	2,59	160 × 20	160 × 20	3 200	8,64
60 × 20	60 × 20	1 200	3,24	160 × 25	160 × 25	4 000	10,80
60 × 25	60 × 25	1 500	4,05	160 × 30	160 × 30	4 800	12,96
60 × 30	60 × 30	1 800	4,86	160 × 40	160 × 40	6 400	17,28
60 × 40	60 × 40	2 400	6,48	–	160 × 50	8 000	21,60
–	80 × 8	640	1,73	–	160 × 60	9 600	25,92
80 × 10	80 × 10	800	2,16	–	180 × 10	1 800	4,86
80 × 12	80 × 12	960	2,59	–	180 × 12	2 160	5,83
80 × 16	80 × 16	1 280	3,45	–	180 × 16	2 880	7,78
80 × 20	80 × 20	1 600	4,32	–	180 × 20	3 600	9,72
80 × 25	80 × 25	2 000	5,40	–	180 × 25	4 500	12,15
80 × 30	80 × 30	2 400	6,48	–	180 × 30	5 400	14,58
80 × 40	80 × 40	3 200	8,64	–	180 × 40	7 200	19,44
–	80 × 50	4 000	10,80	–	200 × 10	2 000	5,40
–	100 × 10	1 000	2,70	–	200 × 12	2 400	6,48
100 × 12	100 × 12	1 200	3,24	–	200 × 16	3 200	8,64
100 × 16	100 × 16	1 600	4,32	–	200 × 20	4 000	10,80
100 × 20	100 × 20	2 000	5,40	–	200 × 25	5 000	13,50
100 × 25	100 × 25	2 500	6,75	–	200 × 30	6 000	16,20
100 × 30	100 × 30	3 000	8,10	–	200 × 40	8 000	21,60
100 × 40	100 × 40	4 000	10,80				

Aluminijski profili

Istokračni kutni profili └ od aluminija i aluminijskih slitina, prešani (HRN C.C3.202 – 1963)

Duljina krakova	Debljina	Presjek	Duljinska gustoća	Duljina krakova	Debljina	Presjek	Duljinska gustoća
$\frac{b}{mm}$	$\frac{\delta}{mm}$	$\frac{S}{mm^2}$	$\frac{\varrho_l}{kg/m}$	$\frac{b}{mm}$	$\frac{\delta}{mm}$	$\frac{S}{mm^2}$	$\frac{\varrho_l}{kg/m}$
10	1	19,2	0,051 8	40	2	156,8	0,423
10	1,5	28,2	0,076 1	40	4	307,0	0,828
10	2	36,8	0,099 3	50	4	387	1,045
12	1	23,2	0,062 6	50	5	480	1,296
12	1,2	27,6	0,074 5	60	5	580	1,565
15	1,5	43,2	0,116 5	60	6	691	1,86
15	2	56,8	0,153 2	80	6	931	2,51
15	2,5	70,0	0,189	80	8	1 229	3,32
20	2	76,8	0,207	100	8	1 549	4,18
20	2,5	95,0	0,256	100	10	1 920	5,18
20	3	112,8	0,304	125	10	2 420	6,53
25	2	96,8	0,261	125	12	2 885	7,78
25	2,5	120,0	0,324	140	12	3 245	8,76
30	3	172,8	0,466	140	14	3 763	10,15
30	4	227,0	0,612	160	12	3 725	10,06
				160	16	4 915	13,27

Profili ⊏ od aluminija i aluminijskih slitina, prešani (HRN C.C3.203 – 1963)

Visina	Širina noge	Debljina [1]	Presjek	Dulj. gustoća	Visina	Širina noge	Debljina [1]	Presjek	Dulj. gustoća
$\frac{h}{mm}$	$\frac{b}{mm}$	$\frac{\delta}{mm}$	$\frac{S}{mm^2}$	$\frac{\varrho_l}{kg/m}$	$\frac{h}{mm}$	$\frac{b}{mm}$	$\frac{\delta}{mm}$	$\frac{S}{mm^2}$	$\frac{\varrho_l}{kg/m}$
25	16	1,6	87,1	0,235	80	50	4	693	1,87
32	16	2	122	0,329	80	50	5	860	2,32
32	20	2	138	0,372	100	50	5	960	2,59
40	20	2	154	0,416	100	50	6	1 143	3,08
40	25	2,5	215	0,581	125	80	6	1 653	4,47
40	30	3	286	0,772	125	80	8	2 178	5,88
40	40	4	455	1,228	140	90	8	2 458	6,64
50	25	2,5	240	0,648	140	90	10	3 041	8,21
50	30	3	316	0,853	160	80	8	2 458	6,64
50	40	4	495	1,335	160	80	10	3 041	8,21
60	30	4	455	1,228	160	100	8	2 778	7,50
60	30	5	560	1,51	160	100	10	3 441	9,30
60	40	4	535	1,44	200	100	12(10)	4 219	11,39
60	40	5	660	1,78	200	125	16(12)	6 121	16,53
80	40	4	615	1,66	250	100	16(12)	5 921	15,99
80	40	5	760	2,05	250	125	16(12)	6 721	18,15

[1] Vrijednosti u zagradama vrijede za debljinu noge.

Profil ⊤ od aluminija i aluminijskih slitina, prešani (HRN C.C3.204 - 1963)

Širina krakova b / mm	Visina h / mm	Debljina δ / mm	Presjek S / mm^2	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m
20	20	1,6	62,6	0,169
20	20	2	78	0,212
20	30	2	98	0,264
20	30	3	145	0,391
25	16	1,6	64	0,173
25	16	2	80	0,216
25	25	2	98	0,264
25	25	2,5	121	0,328
30	30	2	118	0,318
30	30	2,5	146	0,394
30	30	3	175	0,472
30	45	3	220	0,594
30	45	4	291	0,785
40	25	2,5	159	0,429
40	25	3	190	0,513
40	40	3	235	0,634
40	40	4	311	0,839
50	50	3	295	0,796
50	50	4	391	1,055
50	50	5	485	1,310
60	40	4	391	1,055
60	40	5	485	1,310
60	60	5	585	1,58
60	60	6	699	1,87
80	50	5	635	1,71
80	50	6	759	2,05
80	80	6	939	2,53
80	80	8	1 242	3,35
100	100	8	1 562	4,23
100	100	10	1 941	5,24
125	80	8	1 602	4,33
125	80	10	1 991	5,38
125	125	10	2 441	6,59
125	125	12	2 915	7,87
140	90	10	2 241	6,05
140	90	12	2 675	7,22
140	140	12	3 275	8,84
140	140	14	3 804	10,27
160	100	12	3 035	8,19
160	100	14	3 524	9,52
160	160	14	4 364	11,77
160	160	16	4 969	13,41

Profil I od aluminija i aluminijskih slitina, prešani (HRN C.C3.205 -1963)

Visina h / mm	Širina noge b / mm	Debljina δ / mm	Presjek S / mm^2	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m	Visina h / mm	Širina noge b / mm	Debljina δ / mm	Presjek S / mm^2	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m
25	16	1,6	88,2	0,238	125	80	8	2 205	5,95
25	25	1,6	117	0,316	125	125	6	2 208	5,96
30	20	2	135	0,364	125	125	8	2 925	7,90
30	30	2	175	0,473	140	90	8	2 485	6,72
40	25	2,5	218	0,588	140	90	10	3 083	8,33
40	40	4	461	1,245	140	140	8	3 285	8,86
50	30	3	319	0,861	140	140	10	4 083	11,02
50	50	3	439	1,185	160	100	8	2 805	7,57
50	50	5	721	1,947	160	100	10	3 483	9,42
60	40	4	541	1,46	160	160	8	3 765	10,17
60	50	4	621	1,68	160	160	10	4 683	12,64
60	60	5	871	2,35	200	125	10	4 383	11,85
80	50	4	701	1,89	200	125	12	5 231	14,12
80	50	5	871	2,35	200	200	10	5 883	15,90
80	80	4	941	2,54	200	200	12	7 031	18,98
80	80	5	1 171	3,16	250	160	12	6 671	18,01
100	100	5	1 471	3,97	250	160	16	8 820	23,80
100	100	6	1 758	4,74	250	250	12	8 831	23,84
125	80	6	1 668	4,50	250	250	15	11 700	31,60

Toplo valjani lim od aluminija i aluminijskih slitina (HRN C.C4.019 - 1963)

Debljina δ / mm	Širina b / mm	Ploštinska gustoća ϱ_A / kg/m^2	Debljina δ / mm	Širina b / mm	Ploštinska gustoća ϱ_A / kg/m^2
4	do 2 500	10,8	15	do 3 000	40,5
5	do 2 500	13,5	20	do 3 000	54,0
6	do 3 000	16,2	25	do 1 000	67,5
8	do 3 000	21,6	30	do 1 000	81,0
10	do 3 000	27,0	40	do 1 000	108
12	do 3 000	32,4			

Duljine: do 10 000 mm.

*

Hladno valjane trake od aluminija i aluminijskih slitina (HRN C.C4.051/151 - 1963).

Hladno valjani lim od aluminija i aluminijskih slitina (HRN C.C4.050/150 - 1963).

Okrugle cijevi od aluminija i aluminijskih slitina, vučene i prešane
(HRN C.C5.030/031/130/131 – 1966)

Vanjski promjer [1] (R 10) d mm	Debljina stijenke [2] vučeno al. δ mm	Debljina stijenke [2] vučeno sl. δ mm	Debljina stijenke [2] prešano al. sl. δ mm	Presjek S mm^2	Duljinska gustoća ϱ_l kg/m
4	0,5	0,5	–	5,49	0,015
	0,8	0,8	–	8,04	0,022
	1	–	–	9,42	0,025
5	0,5	0,5	–	7,07	0,019
	0,8	0,8	–	10,55	0,029
	1	1	–	12,57	0,034
8	0,5	0,5	–	11,78	0,032
	0,8	0,8	–	18,10	0,049
	1	1	–	22,01	0,059
	1,2	1,2	–	25,64	0,069
	1,6	1,6	–	32,17	0,086
10	0,5	–	–	14,92	0,040
	0,8	0,8	–	23,12	0,062
	1	1	–	28,27	0,076
	1,2	1,2	–	33,18	0,090
	1,6	1,6	–	42,22	0,114
	2	2	–	50,27	0,136
12	0,5	–	–	18,06	0,049
	0,8	0,8	–	28,15	0,076
	1	1	–	34,46	0,093
	1,2	1,2	–	40,72	0,110
	1,6	1,6	–	52,28	0,141
	2	2	–	62,83	0,170
16	0,5	–	–	24,35	0,066
	0,8	0,8	–	38,20	0,103
	1	1	–	47,12	0,127
	1,2	1,2	–	55,80	0,151
	1,6	1,6	–	72,38	0,195
	2	2	–	87,97	0,238
	2,5	2,5	–	106,0	0,286
20	0,5	–	–	30,63	0,083
	0,8	0,8	–	48,26	0,130
	1	1	–	59,69	0,161
	1,2	1,2	–	70,87	0,191
	1,6	1,6	–	92,49	0,250
	2	2	–	113,1	0,305
	2,5	2,5	–	137,4	0,371
	3	3	–	160,2	0,433

[1] Uzeti su u obzir samo promjeri normnih brojeva osnovnog reda R 10.
[2] Vrijednosti: »al« za cijevi od aluminija, a »sl« za cijevi od aluminijskih slitina.

Okrugle cijevi od aluminija i aluminijskih slitina, vučene i prešane
(nastavak)

Vanjski promjer [1] (R 10) d mm	Debljina stijenke [2] vučeno al. δ mm	Debljina stijenke [2] vučeno sl. δ mm	Debljina stijenke [2] prešano al. sl. δ mm	Presjek S mm^2	Duljinska gustoća ϱ_l kg/m
25	0,5	–	–	38,49	0,104
	0,8	0,8	–	60,82	0,164
	1	1	–	74,40	0,204
	1,2	1,2	1,2	89,72	0,242
	1,6	1,6	1,6	117,6	0,318
	2	2	2	144,5	0,390
	2,5	2,5	2,5	176,7	0,477
	3	3	3	207,4	0,560
32	0,8	0,8	–	78,41	0,212
	1	1	–	97,39	0,263
	1,2	1,2	1,2	116,1	0,314
	1,6	1,6	1,6	152,8	0,413
	2	2	2	188,5	0,509
	2,5	2,5	2,5	231,7	0,626
	3	3	3	273,3	0,738
	4	4	4	351,9	0,950
	–	5	5	424,1	1,15
	–	6	6	490,1	1,32
	–	8	8	603,2	1,63
40	0,8	–	–	98,68	0,266
	1	1	–	122,7	0,331
	1,2	1,2	–	146,3	0,395
	1,6	1,6	–	193,0	0,521
	2	2	2	238,9	0,645
	2,5	2,5	2,5	294,7	0,795
	3	3	3	348,9	0,942
	4	4	4	452,6	1,22
	5	5	5	549,6	1,48
	–	6	6	640,9	1,73
	–	8	8	804,3	2,17
50	1	1	–	153,9	0,416
	1,2	1,2	–	183,9	0,497
	1,6	1,6	–	243,3	0,657
	2	2	–	301,6	0,814
	2,5	2,5	2,5	373,1	1,01
	3	3	3	444,0	1,20
	4	4	4	578,1	1,56
	5	5	5	706,9	1,91
	–	6	6	829,4	2,24
	–	8	8	1 055	2,85

[1] Uzeti su u obzir samo promjeri normnih brojeva osnovnog reda R 10.
[2] Vrijednosti: »al« za cijevi od aluminija, a »sl« za cijevi od aluminijskih slitina.

Okrugle cijevi od aluminija i aluminijskih slitina, vučene i prešane *(nastavak)*

Vanjski promjer [1] (R 10) $\frac{d}{mm}$	Debljina stijenke [2] vučeno al. $\frac{\delta}{mm}$	vučeno sl.	prešano al. $\frac{\delta}{mm}$	prešano sl.	Presjek $\frac{S}{mm^2}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{kg/m}$
63	1,2	1,2	–		233,0	0,629
	1,6	1,6	–		308,6	0,833
	2	2	–		383,3	1,04
	2,5	2,5	–		475,2	1,28
	3	3	–		565,5	1,53
	4	4	4		741,2	2,00
	5	5	5		911,1	2,46
	–	6	6		1 074	2,90
	–	8	8		1 382	3,73
	–	10	10		1 665	4,50
80	1,6	1,6	–		394,1	1,06
	2	2	–		490,1	1,31
	2,5	2,5	–		608,8	1,64
	3	3	–		727,7	1,96
	4	4	4		955,1	2,58
	5	5	5	5	1 178	3,18
	6	6	6	6	1 385	3,74
	8	8	8	8	1 810	4,89
	–	10	10	10	2 199	5,94
100	2	2	–	–	615,8	1,66
	2,5	2,5	–	–	765,8	2,07
	3	3	–	–	914,2	2,47
	4	4	4	4	1 206	3,26
	5	5	5	5	1 492	4,03
	6	6	6	6	1 772	4,78
	8	8	8	8	2 312	6,24
	10	10	10	10	2 827	7,63
	–	–	12	–	3 318	8,96
125	3	3	–	–	1 150	3,11
	4	4	4	4	1 521	4,11
	5	5	5	5	1 885	5,09
	6	6	6	6	2 243	6,06
	8	8	8	8	2 941	7,94
	10	10	10	10	3 613	9,76
	12	12	12	12	4 260	11,5
160	3	–	–	–	1 480	4,00
	4	–	4	4	1 960	5,29
	5	–	5	5	2 425	6,55

[1] Uzeti su u obzir samo promjeri normnih brojeva osnovnog reda R 10.

[2] Vrijednosti: »al« za cijevi od aluminija, a »sl« za cijevi od aluminijskih slitina.

Okrugle cijevi od aluminija i aluminijskih slitina, vučene i prešane *(konac)*

Vanjski promjer [1] (R 10) $\frac{d}{mm}$	Debljina stijenke [2] vučeno al. $\frac{\delta}{mm}$	vučeno sl.	prešano al. $\frac{\delta}{mm}$	prešano sl.	Presjek $\frac{S}{mm^2}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{kg/m}$
160	6	–	6	6	2 903	7,84
	8	–	8	8	3 820	10,3
	10	–	10	10	4 712	12,7
	12	–	12	12	5 580	15,1
200	4	–	4	4	2 463	6,65
	5	–	5	5	3 063	8,27
	6	–	6	6	3 657	9,87
	8	–	8	8	4 824	13,0
	10	–	10	10	5 969	16,1
	12	–	12	–	7 087	19,1
250	5	–	5	5	3 849	10,4
	6	–	6	6	4 599	12,4
	8	–	8	8	6 082	16,4
	10	–	10	10	7 540	20,4
	12	–	12	–	8 972	24,2

Okrugle cijevi od aluminija i aluminijskih slitina, koje imaju promjere normnih brojeva osnovnih redova R 20 i R 40

Vanjski promjer R 20 $\frac{d}{mm}$	R 40	Debljine stijenke: vučene, aluminij $\frac{\delta}{mm}$	vučene, aluminijske slitine $\frac{\delta}{mm}$	prešane, aluminij $\frac{\delta}{mm}$	prešane, aluminijske slitine $\frac{\delta}{mm}$
	6	0,5 ... 1,2	0,5 ... 1,2	–	–
14		0,5 ... 2	0,8 ... 2	–	–
18		0,5 ... 2,5	0,8 ... 2,5	–	–
22		0,5 ... 3	0,8 ... 3	–	–
28		0,5 ... 3	0,8 ... 3	1,2 ... 3	1,2 ... 3
	30	0,8 ... 4	0,8 ... 6	1,2 ... 6	1,2 ... 6
36		0,8 ... 4	0,8 ... 8	1,6 ... 8	1,6 ... 8
	38	0,8 ... 4	0,8 ... 8	2 ... 8	2 ... 8
45		1 ... 5	–	2,5 ... 8	2,5 ... 8
56		1,2 ... 5	1,2 ... 8	3 ... 8	3 ... 8
70		1,5 ... 6	1,6 ... 8	4 ... 8	5 ... 8
90		2 ... 8	2 ... 8	5 ... 8	5 ... 8
110		3 ... 10	–	5 ... 12	5 ... 10
140		3 ... 12	–	4 ... 12	4 ... 10
180		4 ... 12	–	4 ... 12	4 ... 10
220		5 ... 12	–	5 ... 12	5 ... 10

[1] Uzeti su u obzir samo promjeri normnih brojeva osnovnog reda R 10.

[2] Vrijednosti: »al« za cijevi od aluminija, a »sl« za cijevi od aluminijskih slitina.

Bakrene šipke, lim i žica

Okrugle šipke, vučene (HRN C.D3.520 – 1982)

Promjer d / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m	Promjer d / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m	Promjer d / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/m
0,5	0,00175	4,5	0,141	22	3,38
0,6	0,00252	5	0,175	25	4,37
0,8	0,00447	5,5	0,211	28	5,48
1,0	0,00699	6	0,252	32	7,16
1,2	0,0101	6,5	0,295	36	9,06
1,4	0,0137	7	0,342	40	11,2
1,6	0,0175	8	0,447	45	14,1
1,8	0,0116	9	0,566	50	17,5
2,0	0,0179	10	0,699	56	21,9
2,2	0,0338	11	0,846	60	25,2
2,5	0,0437	12	1,01	63	27,7
2,8	0,0548	14	1,37	70	34,2
3	0,0629	16	1,79	75	39,3
3,5	0,0856	18	2,26	80	44,7
4	0,112	20	2,79		

Kvadratne šipke, vučene (HRN C.D3.525 – 1972), debljina: 2 ... 60 mm

Šesterokutne šipke, vučene (HNR C.D3.527 – 1972), otvor ključa: 3 ... 60 mm

Plosnate šipke, vučene (HNR C.D3.523 – 1982), debljina: 2 ... 40 mm, širina: 4 ... 200 mm

Limovi, hladno valjani (HNR C.D4.520 – 1972)

Debljina δ / mm	Ploštinska gustoća ϱ_A / kg/m²	Debljina δ / mm	Ploštinska gustoća ϱ_A / kg/m²	Debljina δ / mm	Ploštinska gustoća ϱ_A / kg/m²
0,20	1,89	0,70	5,91	2,0	16,9
0,25	2,11	0,80	6,75	2,5	21,1
0,30	2,53	0,90	7,60	3,0	25,4
0,35	2,96	1,0	8,45	3,5	29,6
0,40	3,38	1,1	9,30	4,0	34,8
0,45	3,80	1,2	10,1	4,5	38,0
0,50	4,23	1,5	12,7	5,0	42,3
0,60	5,06	1,8	15,2		

Širina: 1 000 mm, duljina: 2 000 mm.

Tanki limovi, hladno valjani (HRN C.D4.521 – 1972)

Žica, vučena (HRN C.D6.520 – 1972)

Okrugla žica

Debljina δ / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/km	Debljina δ / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/km	Debljina δ / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/km
0,02	0,002 8	0,45	1,42	3,5	85,6
0,05	0,017 5	0,50	1,75	4,0	112
0,06	0,025 1	0,56	2,19	4,5	142
0,07	0,034 2	0,60	2,52	5,0	175
0,08	0,044 7	0,70	3,42	5,5	211
0,09	0,056 6	0,80	4,47	6,0	252
0,10	0,068 9	0,90	5,66	6,5	295
0,12	0,101	1,0	6,99	7,0	342
0,14	0,137	1,2	10,1	8	447
0,16	0,179	1,4	13,7	9	566
0,18	0,226	1,6	17,9	10	699
0,20	0,280	1,8	22,6	11	846
0,22	0,330	2,0	28,0	12	1010
0,25	0,437	2,2	33,8	14	1370
0,28	0,548	2,5	43,7	16	1790
0,30	0,629	2,8	54,8	18	2265
0,36	0,906	3,0	62,9		
0,40	1,12	3,2	71,6		

Kvadratna žica

Debljina δ / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/km	Debljina δ / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/km	Debljina δ / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/km
3,0	80,1	6	320	12	1282
3,5	109	7	436	13	1504
4,0	142	8	570	14	1744
4,5	180	9	721	16	2278
5,0	222	10	890	17	2572
5,5	269	11	1077		

Šesterokutna žica

Debljina δ / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/km	Debljina δ / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/km	Debljina δ / mm	Duljinska gustoća ϱ_l / kg/km
3,0	69,4	6	277	12	1120
3,5	94,4	7	378	13	1303
4,0	123	8	493	14	1510
4,5	156	9	624	17	2238
5,0	193	10	771		
5,5	233	11	933		

Bakrena užad (za električne vodiče)

Konstrukcija užeta broj žica × promjer žice mm	Vanjski promjer užeta $\frac{d}{\text{mm}}$	Ukupni presjek žica $\frac{S}{\text{mm}^2}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{\text{kg/km}}$	Dulj. električni otpor (20 °C) $R'/(\Omega/\text{km})$
7 × 1,70	5,10	16	143	1,11
7 × 2,10	6,30	25	222	0,715
7 × 2,5	7,50	35	311	0,51
7 × 3,0	9,00	50	443	0,36
19 × 2,1	10,50	70	620	0,26
19 × 2,5	12,50	95	844	0,19
19 × 2,8	14,00	120	1064	0,15
(19 + 18) × 2,25	16,50	150	1340	0,12

Bakrene cijevi, vučene (HRN C.D5.500 – 1972, 501 – 1973)

Vanjski promjer $\frac{d}{\text{mm}}$	Duljinska gustoća cijevi ϱ_l/(kg/m) [1) pri debljini stijenke (mm) 0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
4	0,05	0,07	0,08	–	–	–	–	–	–
5	0,06	0,09	0,11	–	–	–	–	–	–
6	0,08	0,11	0,14	–	–	–	–	–	–
7	0,09	0,13	0,17	–	–	–	–	–	–
8	0,10	0,15	0,20	0,27	–	–	–	–	–
9	0,12	0,17	0,22	0,31	–	–	–	–	–
10	0,13	0,19	0,25	0,36	0,45	–	–	–	–
12	0,16	0,24	0,31	0,44	0,56	–	–	–	–
14	0,19	0,28	0,36	0,52	0,67	–	–	–	–
15	0,20	0,30	0,39	0,57	0,73	0,87	–	–	–
16	0,22	0,32	0,42	0,61	0,78	0,94	–	–	–
18	0,24	0,36	0,48	0,69	0,89	1,08	1,26	–	–
20	–	0,40	0,53	0,78	1,01	1,22	1,43	1,79	–
22	–	–	0,59	0,86	1,12	1,36	1,59	–	–
24	–	–	0,64	–	1,23	–	–	–	–
25	–	–	0,67	0,99	1,29	1,57	1,85	2,35	2,80
28	–	–	0,75	1,11	1,45	1,78	2,10	2,68	–
30	–	–	0,81	1,20	1,57	1,92	2,26	2,91	3,50
32	–	–	0,87	1,28	1,68	–	–	–	–
35	–	–	0,95	1,40	1,85	2,27	2,68	–	–
38	–	–	1,03	1,53	2,01	2,48	2,94	3,80	–
40	–	–	1,09	1,61	2,12	2,62	3,10	–	4,89
42	–	–	1,15	1,70	2,24	2,76	3,27	4,25	5,17
44,5	–	–	–	–	–	2,94	3,48	4,53	5,52
45	–	–	–	1,82	2,40	2,97	3,52	–	5,59
48	–	–	–	1,95	2,57	–	3,77	4,92	–
50	–	–	1,37	2,03	2,68	3,32	3,94	–	6,29

[1] Normirane su one cijevi, za koje je u tablici navedena duljinska masa.

Bakrene cijevi, vučene (*konac*)

Vanjski promjer $\frac{d}{\text{mm}}$	Duljinska gustoća cijevi ϱ_l/(kg/m) [1) pri debljini stijenke (mm) 1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
54	2,20	2,91	–	–	–	–
55	–	–	3,67	–	–	–
56	–	–	–	4,45	–	–
57	–	–	3,81	4,53	5,93	7,27
58	–	–	–	–	6,04	7,41
60	–	3,24	4,02	4,78	6,26	7,69
64	2,62	3,47	–	–	–	–
65	–	–	4,37	–	–	–
66	–	–	–	5,28	–	–
70	–	3,80	4,72	–	–	9,09
74	–	4,03	–	–	–	–
75	–	–	5,07	–	–	–
76	–	–	5,14	6,12	8,05	9,93
80	–	–	5,42	–	8,50	10,5
84	–	4,59	–	–	–	–
85	–	4,64	5,77	–	–	–
86	–	–	–	6,96	–	–
89	–	–	6,05	7,21	9,51	11,7
100	–	5,48	–	8,14	–	–
105	–	–	7,16	–	–	–
106	–	–	–	8,64	–	–
108	–	–	–	8,81	11,6	14,4
114	–	–	–	9,31	12,3	–
120	–	–	8,21	–	–	16,1
130	–	–	–	–	–	17,5
133	–	–	–	10,9	14,4	–
150	–	–	–	–	–	20,3
159	–	–	–	–	17,3	21,5
170	–	–	–	–	18,6	23,1
190	–	–	–	–	–	25,9
194	–	–	–	–	21,2	–
200	–	–	–	–	–	27,3
219	–	–	–	–	24,0	–
267	–	–	–	–	29,4	–
273	–	–	–	–	30,1	–
324	–	–	–	–	35,8	–
368	–	–	–	–	40,7	–
419	–	–	–	–	46,4	–

[1] Normirane su one cijevi, za koje je u tablici navedena duljinska gustoća.

Cijevi od bakrenih slitina, vučene (HRN C.D5.520 - 1972, 522 - 1973)

Vanjski promjer	Duljinska gustoća cijevi ϱ_l/(kg/m) [1)] pri debljini stijenke (mm)								
$\frac{d}{\text{mm}}$	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
4	0,05	0,07	0,08	-	-	-	-	-	-
5	0,06	0,09	0,11	-	-	-	-	-	-
6	0,08	0,11	0,14	-	-	-	-	-	-
7	-	-	0,17	-	-	-	-	-	-
8	0,10	0,15	0,20	0,27	0,34	-	-	-	-
9	-	-	0,22	-	-	-	-	-	-
10	0,13	0,19	0,25	0,36	0,45	0,52	0,59	-	-
12	0,16	0,24	0,31	0,44	0,56	0,66	0,75	0,89	-
14	0,19	0,28	0,36	0,52	0,67	0,80	0,92	1,12	-
15	0,20	0,30	0,39	0,57	0,73	0,87	1,01	1,23	-
16	0,22	0,32	0,42	0,61	0,78	0,94	1,09	1,34	-
18	0,24	0,36	0,48	0,69	0,89	-	1,26	1,57	1,82
20	0,27	0,40	0,53	0,78	1,01	1,22	1,43	1,79	2,10
22	-	0,45	0,59	0,86	1,12	-	1,59	2,01	2,38
25	-	0,51	0,67	0,99	1,29	1,57	1,85	2,35	2,80
28	-	-	0,75	1,11	1,45	1,78	2,10	2,68	3,22
30	-	-	0,81	1,20	1,57	1,92	2,26	2,91	3,50
32	-	-	0,87	1,28	1,68	-	-	-	-
35	-	-	0,95	1,40	1,85	2,27	2,68	3,47	4,19
38	-	-	1,03	1,53	2,01	2,48	2,94	3,80	4,61
40	-	-	1,09	1,61	2,12	2,62	3,10	4,03	4,89
42	-	-	1,15	1,70	2,24	2,76	3,27	-	-
44,5	-	-	-	1,80	2,38	2,94	3,48	-	-
45	-	-	-	1,82	2,40	2,97	3,52	-	-
48	-	-	-	1,95	2,57	-	-	4,92	-
50	-	-	1,37	2,03	2,68	3,32	3,94	5,14	6,29
55	-	-	-	-	-	3,67	4,36	-	6,99
56	-	-	-	-	-	-	4,45	-	-
57	-	-	-	2,33	3,08	3,81	4,53	-	-
58	-	-	-	-	-	-	-	6,04	-
60	-	-	-	2,45	3,24	4,02	4,78	6,26	7,69
64	-	-	-	-	3,47	-	-	-	-
65	-	-	-	-	-	4,37	-	-	-
66	-	-	-	-	-	-	5,28	-	-
70	-	-	-	2,87	3,80	4,72	5,62	7,38	9,09

1) Duljinska gustoća je računana na temelju gustoće bakra ϱ = 8900 kg/m^3. Gustoću slitine ϱ koja je iskazana jedinicom kg/m^3 treba vrijednosti iz tablice pomnožiti sa ϱ/8900.

Cijevi od bakrenih slitina, vučene (*konac*)

Vanjski promjer	Duljinska gustoća cijevi ϱ_l/(kg/m) [1)] pri debljini stijenke (mm)					
$\frac{d}{\text{mm}}$	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0
75	-	5,07	-	-	-	-
76	4,14	5,14	6,12	-	-	-
80	-	5,42	6,46	8,50	10,5	-
85	4,64	5,77	-	-	11,2	-
86	-	-	6,96	-	-	-
89	4,87	6,05	7,21	-	13,3	-
100	5,48	-	8,14	10,7	-	-
104	5,70	-	-	-	-	-
105	-	7,16	-	-	-	-
106	-	-	8,64	-	-	-
108	-	7,37	8,81	11,6	-	-
114	-	7,79	9,31	-	-	-
120	-	8,21	-	-	16,1	-
125	-	8,56	-	13,5	16,8	-
130	-	-	-	-	17,5	-
133	-	9,12	10,9	14,4	17,9	-
150	-	-	-	-	20,3	-
159	-	10,9	13,1	17,3	21,5	-
160	-	-	-	17,5	-	-
168	-	11,6	13,8	18,3	-	-
170	-	-	-	-	23,1	-
190	-	-	-	-	25,9	-
194	-	13,4	16,0	-	-	-
200	-	-	-	21,9	27,3	-
219	-	-	18,1	24,0	29,9	-
267	-	-	22,1	29,4	36,6	-
273	-	-	22,6	30,1	37,5	-
324	-	-	-	35,8	44,6	53,3
368	-	-	-	40,7	50,7	60,7
419	-	-	-	46,4	57,9	69,3

*

Cijevi **za kondenzatore i izmjenjivače topline** (HRN C.D5.521 - 1981)

1) Duljinska gustoća je računana na temelju gustoće bakra ϱ = 8900 kg/m^3. Gustoću slitine ϱ koja je iskazana jedinicom kg/m^3 treba vrijednosti iz tablice pomnožiti sa ϱ/8900.

Mjedeni poluproizvodi

Mjedene šipke, istiskane

Okrugle šipke (HRN C.D3.522 – 1982)
Plosnate šipke (HRN C.D3.524 – 1956)
Kvadratne šipke (HRN C.D3.526 – 1956)
Šesterokutne šipke (HRN C.D3.528 – 1956)

Mjedeni kutni profili
istokokračni, prešani (HRN C.D3.529 – 1956)
duljine krakova: 10 × 10 ... 60 × 60 mm
raznokračni, prešani (HRN C.D3.530/531 – 1956)
duljine krakova: 10 × 20 ... 25 × 50, 15 × 20 ... 30 × 45 mm

Mjedena žica (okrugla)
prešana (HRN C.D6.521 – 1956), promjeri 5 ... 15 mm

Cinčani poluproizvodi

Pri određivanju mase poluproizvoda od cinka računamo s gustoćom od ϱ = 7180 kg/m^3.

Cinčani lim (HRN C.E4.020 – 1970)
debljina lima: 0,2 ... 6 mm
veličina ploče: 1000 × 2000 (3000) mm

Olovni poluproizvodi

Pri određivanju mase poluproizvoda od olova računamo s gustoćom od ϱ = 11 400 kg/m^3.

Olovni lim (HRN C.E4.030 – 1963)
debljina lima: 1 ... 4 mm
širina: 1 000 mm
duljina: do 10 000 mm

Olovne cijevi
– *dovodne cijevi* (HRN C.E4.040 – 1963)
unutarnji promjeri: 10 ... 26 mm
debljina stijenki: 2,0 ... 7 mm
– *odvodne cijevi* (HRN C.E4.041 – 1963)
unutarnji promjeri: 30 ... 125 mm
debljina stijenki: 2,0 ... 2,5 mm
Olovna žica (HRN C.E6.050 – 1965)
promjeri: 2 ... 20 mm

NEKOVINSKE TVARI

ANORGANSKE NEKOVINSKE TVARI

Staklo

Staklo se sastoji od natrijevih i kalcijevih (te kalijevih i bornih) silikata. Posebna mu svojstva daju dodatci oksida nekih kovina (Pb, Mg, Al, Zn, Te).

Staklo je amorfno (nema kristalne strukture) i zato bez određenog tališta prelazi iz tekućeg u kruto stanje. Pri temperaturi 1 300 do 1 500 °C može biti tekuća talina (lijevanje!), pri temperaturi 1 000 °C je gusta tekućina prikladna za preradbu (puhanjem, vučenjem, valjanjem, prešanjem). Temperatura omekšavanja (prijelaza u krutinu) je približno 500 °C. Kremeno staklo (SiO_2) omekšava se pri 1 200 °C.

Pri temperaturi okolice staklo je u amorfnom stanju pothlađene tekućine. Njegova je tlačna čvrstoća 400 ... 1 300 N/mm^2, vlačna čvrstoća 30 ... 90 N/mm^2.

Najznačajnija su svojstva stakla: propusnost svjetla (85 ... 90 %), kemijska otpornost na zrak, vodu i kiseline (osim fluorovodične HF) i neprovodnost za električne struje.

Uporaba: natrijsko staklo – za armature manjih zahtjeva; borno – za aparate s većim zahtjevima; kremeno – za dijelove pri višim temperaturama.

Brzim hlađenjem vruće staklene ploče pojavljuju se na površini tlačna naprezanja koja povećavaju savojnu čvrstoću. Takvo se staklo pri lomu raspada u komadiće. Staklene ploče, obostrano obljepljene folijom od prozirne polimerne tvari, rabe se kao sigurnosna stakla (npr. za automobile).

Beton

Cementni beton je umjetni kamen od cementa, betonskih dodataka (pijeska i šljunka) i vode, a nastaje skrućivanjem cementnog veziva (mješavine cementa s vodom).

Portland cement se sastoji od 1 dijela $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ i najmanje 1,7 dijela CaO.

Obujamni omjer mješavine cement : pijesak	Tlačna čvrstoća betona [1) R_{mt} / N/mm^2	Volumenski omjer mješavine cement : pijesak : šljunak	Tlačna čvrstoća betona [1) R_{mt} / N/mm^2
1 : 4	22 ... 30	1 : 2 : 3	22 ... 25
1 : 5	18 ... 22	1 : 3 : 5	13 ... 18
1 : 8	9 ... 12	1 : 4 : 6	10 ... 12

Zbog male vlačne čvrstoće (u odnosu na tlačnu) ojačavaju se vlačno napregnuta područja u betonu čeličnim ulošcima (armirani beton). Ako

[1) Nakon 28 dana.

su čelični ulošci prednapregnuti, izazivaju u neopterećenom stanju u betonu tlačna naprezanja radi kojih je moguće, da se pri opterećenju uopće ne pojavljuju vlačna naprezanja (prednapregnuti beton).

Pjenasti beton je normalni (teški) beton gustoće 2 200 ... 2 600 kg/m³. Toplinu provodi razmjerno dobro. Lakim dodatcima (npr. mljevenom drvenom piljevinom, drvenom vunom i sl.) te odgovarajućom obradbom stvaraju se u betonu pore (zrak) koje mu veoma snizuju gustoću (na 300 ... 500 kg/m³) pa mu se zbog velikog smanjenja tlačne čvrstoće smanjuju nosivost, ali mu veoma povećavaju izolacijsku sposobnost.

Polimerni beton je umjetni kamen pri kojemu umjesto cementa rabimo kao vezivo razna ljepila na temelju polimera (MMA, UP). Polimerni beton (s 5 ... 15 % veziva) postiže nakon jednog dana sljedeća mehanička svojstva:

tlačnu čvrstoću 70 ... 150 N/mm², modul elastičnosti 15 000 ... 30 000 N/mm², savojnu čvrstoću 20 ... 40 N/mm², toplinska rastezljivost (15 ... 20) 10^{-6} K^{-1}.

Rabi se za temelje strojeva i konstrukcija, mjerne ploče. I polimerni beton može biti pjenast.

Keramičke tvari

Keramičke tvari sadrže većinom okside. Svi čisti oksidi su kemijski vrlo postojani i imaju visoka tališta:

Al_2O_3: 2 046 °C   BeO: 2 530 °C
SiO_2: 1 702 °C ZrO_2: 2 700 °C.

Sinterirani korund (Al_2O_3) odlikuje se velikom tvrdoćom 3800 HV 30 i velikom tlačnom čvrstoćom. (Dodatkom Cr_2O_3 čistom Al_2O_3 nastaje sinterirani rubin tvrdoće 4000 HV 30).

Sinterirani se korund rabi za izradbu dijelova posebno otpornih na trošenje (matrice za vučenje žice, dijelovi tekstilnih strojeva) i postojani u visokoj temperaturi (svječice motora s unutarnjim izgaranjem i sl.).

Tvrdoća, koja se ni pri visokim temperaturama (do 1 200 °C) bitno ne smanjuje i mala toplinska provodnost su svojstva sinteriranog korunda koja su naročito značajna za izradbu reznog alata (tokarenje, glodanje) i brušenje.

Složena keramička tvar $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ je veoma otporna na trošenje (pri dodirnim plohama mjerila). Tvar $MgO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ (kao i $MgO \cdot SiO_2$) vrlo je otporna na temperaturne promjene.

Od kvalitetne gline koja – osim Al_2O_3 – sadrži i SiO_2 te alkalne okside (kao i posebne dodatke) izrađena keramička tvar ima vlačnu čvrstoću 6,5 ... 13 N/mm², tlačnu čvrstoću 320 ... 350 N/mm². Zbog velike otpornosti prema kiselinama rabi se u kemijskoj industriji za aparate i strojne dijelove (pumpe, ventilatore, mješalice i sl.).

Opeka je pri temperaturi 900 ... 1 300 °C pečena glina (ponajprije Al_2O_3). Tlačna čvrstoća opeka iznosi (po kvaliteti) 10 ... 25 (... 35) N/mm². Normalne izmjere opeke: 240 × 114 × 71 mm.

Vatrostalna keramička tvar

Talište mora biti najmanje 1 580 °C. Za kvalitetu su odlučujući još: temperatura na kojoj se tvar pod tlakom smekšava; propustljivost za plinove; otpornost prema temperaturnim promjenama i prema kemijskim utjecajima.

Vatrostalne keramičke tvari dijelimo na:

a) *kisele* – glavni sastojak: kremen (SiO_2),
b) *bazične* – glavni sastojak: dolomitna ($CaO \cdot MgO$) ili magnezitna (MgO),
c) *neutralne* – glavni sastojak: glina, kaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), glinica (Al_2O_3), kromit (Cr_2O_3) ili ugljen (C).

Naziv	Sastav %	Talište $\frac{\vartheta_s}{°C}$	Otportnost prema tlaku do $\frac{\vartheta}{°C}$	Uporaba
silika I	> 94,5 SiO_2 < 2 Al_2O_3 < 3,5 CaO	1 720	1 630	teško opterećeni dijelovi pri visokim temperaturama, velika osjetljivost prema bazičnoj troski
silika II	> 92 SiO_2	1 670	1 560	
kremeni šamot (polukiseli)	≈ 90 SiO_2 + Al_2O_3 + CaO + Fe_2O_3	1 650	1 470	srednje opterećeni dijelovi
šamot (bazični)	55 ... 60 SiO_2 36 ... 41 Al_2O_3 0,2 ... 0,6 CaO 0,8 ... 0,2 Fe_2O_3	> 1 580	1 300	manje opterećeni dijelovi ložišta (dimni kanali)
silimanit	55 ... 60 Al_2O_3 ost. SiO_2	≈ 1 875	1 620	otporan prema troski i temperaturnim promjenama
magnezit	85 ... 88 MgO 4 ... 6 SiO_2 1 ... 2 CaO 1 ... 2 Al_2O_3 4 ... 5 Fe_2O_3	> 2 000	1 400	za peći s bazičnom oblogom, velika osjetljivost prema temperaturnim promjenama
kromni magnezit	> 42 MgO > 15 Cr_2O_3	≈ 1 960	1 560	otporan prema visokim temperaturama, brzim temperaturnim promjenama i utjecaju troske
karborund	45 ... 80 SiC 10 ... 25 SiO_2 9 ... 20 Al_2O_3 + Fe_2O_3	> 2 000	1 700	neosjetljiv prema temperaturnim promjenama; iznad 1 600 °C raspada se zbog oksidirajućih plinova
ugljen	85 ... 90 C	> 2 000	1 750	lonci, peći, elektrode

DRVO

Drvo se odlikuje malom gustoćom, razmjerno velikom čvrstoćom i lakom obradbom.

Rabimo ga kao gradivo (u građevinarstvu, brodogradnji, za vozila, u tekstilnoj industriji itd.) ili kao sirovinu (za izradbu papira i celuloze).

Vrsta drveta	Gustoća ϱ / kg/m³	Smjer s obzir. vlakna	Čvrstoća: vlačna R_m / N/mm²	tlačna R_{mt} / N/mm²	savojna R_{ms} / N/mm²	smična R_{ms} / N/mm²
brijest	500 ... 850	∥ ⊥	60 ... 210 4	30 ... 60 10	50 ... 160 –	7 25
bukva	500 ... 900	∥ ⊥	60 ... 180 7	40 ... 80 10	60 ... 180 –	5 ... 20 35
grab	500 ... 850	∥ ⊥	50 ... 200 6	40 ... 80 10	50 ... 140 –	10 30
jasen	500 ... 900	∥ ⊥	30 ... 220 7	30 ... 60 10	50 ... 180 –	7 –
hrast	400 ... 950	∥ ⊥	50 ... 180 5	40 ... 60 10	70 ... 100 –	5 ... 15 30
orah	600 ... 750	∥ ⊥	100 4	40 ... 70 10	80 ... 140 –	– –
bor	300 ... 900	∥ ⊥	40 ... 190 3	30 ... 80 10	40 ... 200 90	5 ... 15 20
jela	300 ... 700	∥ ⊥	50 ... 120 2	30 ... 50 4	40 ... 100 –	5 25
smreka	300 ... 700	∥ ⊥	40 ... 240 3	30 ... 70 5 ... 10	40 ... 120 –	5 ... 10 25

Na zraku sušeno drvo ima približno (10)12 ... 15(20) vlage. Povećanjem vlage čvrstoća se osjetno smanjuje.

Oplemenjeno drvo. – Svojstva drveta možemo poboljšati rezanjem na tanke ploče, furnire, i njihovim lijepljenjem.

Ukočeno drvo su sljepljeni furniri i to:

- kao lamelirani nosači s jendnosmjernim vlaknima (dobra čvrstoća u smjeru vlakana),
- kao vezane ploče s vlaknima pod kutom 45° ili 90° (u svim smjerovima jednolična čvrstoća).

Stolarske ploče (panel-ploče) imaju u unutrašnjosti sljepljene letve, pokrivene s obiju strana furnirom.

Vlaknatice (lesonit) su (razmjerno tanke) ploče, izrađene valjanjem drvene kaše od piljevine i ljepila.

Iverice su (razmjerno deblje) ploče, izrađene valjanjem drvene kaše, obostrano obljepljene furnirom.

Oplemenjene drvene ploče su čvršće i praktički se ne savijaju.

POLIMERNE TVARI

Polimerne tvari su umjetne tvari čiji su glavni sastojci polimeri (v. str. 123). S obzirom na karakteristična svojstva svrstavamo ih u sljedeće glavne skupine:

1. *Plastomeri* su umjetne tvari od polimera koje imaju međusobno fizikalno vezane makromolekule. Po stanju su više ili manje viskozne tekućine. Mogu biti amorfne ili djelomično kristalizirane. Pri temperaturi okolice su tvrdi, a pri zagrijavanju mekšaju (povratno). Lako se mogu preoblikovati i zavarivati. Redovito su topivi u posebnim organskim otapalima. Njihovi se otpatci lako regeneriraju i ponovno rabe. Ubrajaju se:

amorfni plastomeri (koji se skrućuju odnosno mekšaju do taline kontinuirano u širokom temperaturnom području)

PVC – polivinilklorid   PMMA – polimetilmetakrilat
PS – polistiren (polistirol)   PC – polikarbonat
ABS – akrilnitril butadienstieren   CN – celuloid

djelomično kristalni plastomeri (koji se skrućuju iz taline u uskom temperaturnom području – »talištu«)

PE – polietilen   PTFE – politetrafluoretilen
PP – polipropilen   PA – poliamid
SAN – stirenakrilnitril   PETP – polietilentereftalat (poliester)
POM – polioksimetilen

2. *Elastomeri* su umjetne tvari od polimera, koje imaju međusobno labavo vezane makromolekule. Dobivamo ih iz plastomera vulkanizacijom (tj. kemijskim postupkom omreživanja). Uvijek su amorfni. Pri temperaturi okolice su mekogumeno elastični. Već i najmanja naprezanja izazivaju velika elastična produljenja. Ubrajamo npr.:

NR – prirodni kaučuk   IIR – butilni kaučuk
PUR – poliuretanski kaučuk   NBR – akrilnitributadienski kaučuk
SBR – stirenbutadienski kaučuk
BR – butadienski kaučuk   SI – silikonski kaučuk

3. *Duromeri* su umjetne tvari od polimera koje imaju kemijski umrežene makromolekule (nepovratljivi proces). Uvijek su amorfni. Oblikuju se (i učvršćuju) preko taline, a preoblikovanje je ograničeno. Teško se tope i zavaruju. Njihovi otpatci nisu uporabljivi (ili samo kao dodatak). Ovamo spadaju npr.:

PF – fenolna ili fenolformaldehidna smola (fenoplast)
UF – karbamidna ili ureaformaldehidna smola (aminoplast)
MF – melaminska ili melaminformaldehidna smola
UP – nezasićena poliesterska smola
EP – epoksidna smola
PUR – poliuretanska smola

S obzirom na broj polimera i dodavanje drugih organskih ili anorganskih tvari, polimerne tvari dijelimo na sljedeće skupine:

1. *Homogene polimerne tvari* sastoje se od samo jednog polimera. Mogu biti u amorfnom, kristaliziranom ili (kristalno) miješanom stanju. Udio kristalne tvari u cjelokupnoj tvari (mješavini amorfne i kristalizirane tvari) određuje »stupanj kristalizacije« o kojem ovise svojstva tvari.

2. *Heterogene polimerne tvari* sastoje se od polimera i još jedne ili više kemijski različitih tvari koje su s polimerom vezane kemijski ili fizikalno. Ovamo se ubrajaju i međusobno miješani kopolimeri.

3. *Ojačane polimerne tvari* sastoje se od polimera i još jedne ili više kemijski različitih tvari koje mogu biti organske ili anorganske te se većim dijelom osjetno razlikuju od polimera. Tvari su međusobno vezane fizikalno (rijetko kemijski). To su punilima ojačani polimerne tvari.

Kao punila koja se dodaju tekućim (omekšanim) polimernim tvarima dolaze u obzir ponajprije:

- staklena vuna i predivo
- kameno brašno
- tinjac
- azbestna vlakna i vrpce
- drveno brašno
- celuloza
- pamučna vlakna i tkanine
- umjetna svila.

Svim vrstama polimernih tvari mogu se dodati i drugi dodatci, npr. boje.

S obzirom na izbor jednog ili više međusobno miješanih polimera, kojima možemo dodati brojne druge tvari, dobivaju se polimerne tvari veoma raznovrsnih svojstava, prilagođenih zahtjevima uporabe.

Polimerne tvari se (pre)oblikuju raznim tehnološkim postupcima (lijevanjem, injekcijskim prešanjem, istiskivanjem, zavarivanjem, ispuhivanjem, izvlačenjem, predenjem itd.) u:

- poluproizvode (cijevi, ploče, folije)
- dijelove strojeva i aparata (kućišta, strojni elementi)
- pjene, tvrde i meke (ulošci za ojastučenje pokućstva, spužve za čišćenje, podne obloge)
- vlakna (za predivo u tekstilnoj industriji)

ili se rabe kao pomoćna sredstva:

- lakove (za zaštitne i/ili ukrasne predmete)
- ljepila (za keramiku, kovine, drvo, papir).

Mehanička stanja polimernih tvari



Mehanička stanja polimernih tvari su ovisna o temperaturi. Ovu ovisnost pregledno predočuje dijagram modula smičnost G pri raznim temperaturama T.

U dijagramu se razabiru sljedeća područja stanja:

Tvrdoelastično područje (1) obuhvaća niske temperature. U tom su području polimerne tvari tvrde i krhke pa je za njih karakteristična ograničena elastična deformacija s velikim modulom elastičnosti

$$E = 200 \dots 4000\ \text{N/mm}^2\ (= 200 \dots 4000\ \text{MPa}),$$

koji pada s povišenjem temperature.

Strogo uzevši kod polimernih tvari ne postoji čista elastična deformacija, jer se dodatno uvijek javlja – u ovisnosti o vremenu, temperaturi i opterećenju – i visokoelastičan udio preoblikovanja.

Modul smičnosti se u tom području malo mijenja s temperaturom

$$G = 10^2 \dots 10^4\ \text{N/mm}^2\ (= 10^2 \dots 10^4\ \text{MPa}).$$

Područje mekšanja (2) obuhvaća temperature pri kojima je već omogućeno pomicanje molekula (koje u tvrdoelastičnom području – kad su molekule još »smrznute« – nije bilo moguće).

U području mekšanja prelaze polimerne tvari iz krhkoga u žilavo stanje.

Gumielastično područje (3) prostire se od područja mekšanja do taljenja polimerne tvari. Značajka je tog područja vrlo velika elastična deformacija uz malen modul elastičnosti

$$E = 2 \dots 600\ \text{N/mm}^2\ (= 2 \dots 600\ \text{MPa}).$$

Modul smičnosti je u tom području neznatno ovisan o temperaturi

$$G = 0{,}1 \dots 100\ \text{N/mm}^2\ (= 0{,}1 \dots 100\ \text{MPa}).$$

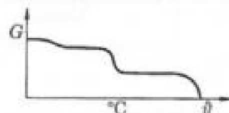
Mekšanje i gumielastično područje se javljaju samo pri amorfnih tvari. Pri kristalnim tvarima, tvrdoelastično stanje seže sve do područja taljenja; kod djelomično kristalnih tvari, mekšanje i gumielastično područje je ovisno o stupnju kristalizacije.

Područje taljenja (4) se kod amorfnih tvari izražava postupnim prijelazom tvari iz gumielastičnog stanja kroz plastično stanje (s izrazitim tečenjem tvari) do potpunog taljenja. Pri djelomično kristalnim tvarima taljenje se zbiva u užem temperaturnom području, a još je izrazitije talište pri kristalnim tvarima.

*

Plastomeri

Amorfni plastomeri
PVC, PMMA, PC, PS, SAN, ABS



Mekšanje i gumielastično područje je izrazito

Djelomično kristalni plastomeri
PE, PP, POM, PA, PTFE, PETP



Mekšanje i gumielastično područje je manje izraženo

Uobičajeni stupanj kristalizacije djelomično kristalnih plastomera:

PA 35 ... 45 %	POM 70 ... 80 %
PE 45 ... 80 %	PTFE 60 ... 80 %
PP 50 ... 80 %	PETP 30 ... 40 %

Mehanička svojstva plastomera

Plastomer	Oznaka	Modul elastičnosti E kN/mm²	Čvrstoća vlačna R_m N/mm²	Čvrstoća savojna R_{ms} N/mm²	Zarezna žilavost a_k kJ/mm²	Tvrdoća (kugl.) H_{pol} N/mm²
polietilen	PE-HD	0,7 ... 1,4	18 ... 35	36	–	40 ... 65
	PE-LD	0,2 ... 0,5	8 ... 23	–	–	13 ... 20
polipropilen	PP	1,1 ... 1,3	21 ... 37	43	3 ... 17	36 ... 37
polivinilklorid	PVC tvrdi	1,0 ... 3,5	50 ... 75	110	2 ... 50	75 ... 155
	PVC meki	–	10 ... 25 [1]	–	–	–
polistiren	PS	3,2 ... 3,3	45 ... 65	90	2 ... 3	120 ... 130
stirenakrilnitril	SAN	3,6	70 ... 85	100	2 ... 3	130 ... 140
akrilnitrilbutadienstiren	ABS	1,9 ... 2,7	32 ... 45	75	7 ... 20	80 ... 120
polimetilmetakrilat	PMMA	2,7 ... 3,2	50 ... 77	105	2 ... 6	180 ... 200
polioksimetilen	POM	2,8 ... 3,2	62 ... 70	110	3 ... 9	150 ... 170
politetrafluoretilen	PTFE	0,41	25 ... 36	18	13 ... 15	27 ... 35
poliamid	PA 6	1,4	70 ... 85	27	8 ... 16	75
	PA 66	2,0	77 ... 84	50	15 ... 20	100
	PA 11	1,0	56	–	30 ... 40	75
	PA 12	1,6	56 ... 65	–	10 ... 20	75
polikarbonat	PC	2,1 ... 2,4	56 ... 67	100	20 ... 30	110
polietilentereftalat	PETP	2,4	39	80	4 ... 5	–
celulozni acetat	CA	2,2	28 [2]	44	15	50
celul. acetbutirat	CAB	1,6	26 [2]	38	30 ... 35	35 ... 43

[1] Istezljivost > 400 %.

[2] Granica tečenja $R_{p\,0,2}$.

Toplinska svojstva i uporaba plastomera

Oznaka	Ispit. po Vicatu ϑ °C	Područje tališta ϑ °C	Toplinska rastezljivost α 1/kK	Topl. provodnost λ W/(m K)	Uporaba
PE-HD	70 ... 75	125 ... 135	0,2	0,50	Cijevi, profili, ploče, folije, pjene, vlakna. Prešani dijelovi otporni na vodu, lužine, blage kiseline.
PE-LD	< 40	110 ... 150	0,25	0,35	
PP	95	157 ... 170	0,16	0,22	
PVC tvrdi	70 ... 90		0,08	0,16	Cijevi, profili, folije, pjene. Dijelovi kem. apar. (pumpe).
PVC meki	40 ... 60		0,15	0,13	
PS	86 ... 91		0,07	0,17	Kućišta i dijelovi kućnih aparata, uredske tehnike, vozila (karoserije, brodica.
SAN	100 ... 110		0,07	0,15	
ABS	90 ... 105		0,10	–	
PMMA	40 ... 108		0,07	0,19	Čisti bezbojni dijelovi (pleksistaklo) ili obojeni. Trošenju podložni dijelovi. Klizni ležaji, zupčanici. Patentni zatvarači.
POM	173		0,09	0,22	
PTFE	50 ... 60		0,16	0,24	Brtve gibljivih dijelova. Ležaji (bez maziva).
PA-6		220	0,08	0,23	Dijelovi otporni na trošenje, udarce i dinamičko opterećenje. Kućišta, klizni ležaji, zupčanici.
PA-66		225 ... 265	0,09	0,27	
PA-11		–	0,09	0,23	
PA-12		172 ... 180	0,11	0,30	
PC	145 ... 150	220 ... 260	0,07	0,21	Ploče, folije. Providna kućišta.
PETP	80	225 ... 258	0,08	0,24	Prozirne folije, čvrste i žilave.
CA	74 ... 110		0,10	0,22	Cijevi, profili, ploče, folije (celofan). Češljevi, naočale, igračke. (Požarna opasnost!)
CAB	65 ... 111		0,12	0,21	

Ojačani plastomeri

Ojačanjem plastomera osjetno se mijenjaju njihova mehanička svojstva: gustoća se povećava, čvrstoća jako raste, rastezljivost se veoma smanjuje. Tim promjenama mijenjaju se i druga mehanička svojstva.

Primjeri mehaničkih svojstava nekih plastomera ojačanih staklenim vlaknima ($sv \approx 30$ %) (zaokružene srednje vrijednosti):

Primjeri mehaničkih svojstava plastomera ojačanih staklenim vlaknima (sv = 30 %) (zaokružene srednje vrijednosti)

Plastomer		PP	PP + sv	SAN	SAN + sv	POM	POM + sv
Gustoća	ϱ/(kg/m^3)	906	1 114	1 080	1 360	1 410	1 560
Čvrstoća	R_m/(N/mm^2)	29	71	75	110	66	130
Istezljivost	%	600	6	4	2	45	3
Plastomer		**PA**	**PA + sv**	**PC**	**PC + sv**	**PETP**	**PETP + sv**
Gustoća	ϱ/(kg/m^3)	1 135	1 400	1 200	1 520	1 330	1 690
Čvrstoća	R_m/(N/mm^2)	75	180	65	100	39	193
Istezljivost	%	30	3	100	3	225	2

Dugotrajna čvrstoća plastomera vrlo je ovisna o trajanju opterećenja pa se s opterećenjem izrazito smanjuje.

Statička izdržljivost plastomera

Trajanje opterećenja t/min	Statička izdržljivost plastomera $R_{m/t/\vartheta}$/(N/mm^2) PE	PVC	PS	ABS
10^{-6}	60	210	90	135
10^{-30}	35	90	65	80
1	20	60	45	45
10^3	15	40	30	25
10^6	10	35	25	20
10^9	8	32	22	18

Naprezanja u plastomeru s vremenom popuštaju (relaksacija).

Prvobitno se naprezanje uz konstantnu deformaciju smanjuje (što valja uzeti u obzir u određenim slučajevima, npr. pri brtvama).

Uz stalno opterećenje deformacija raste – javlja se puzanje tvari, ovisno o veličini opterećenja i njegovom trajanju (stoga treba pri projektiranju odabrati takvo opterećenje dijelova, pri kojem je – s obzirom na puzanje – za određeno trajanje osigurana njihova svrhovitost).

Dinamička izdržljivost plastomera

Plastomer	PE	SAN	PA 6	PC
Broj titraja N	10^8	10^7	10^8	10^7
Dinamička izdržljivost R_d/(N/mm^2)	17	20	30	6

Dinamička izdržljivost polivinilklorida (PVC)

Broj titraja N	10^4	10^5	10^6	10^7
Dinamička izdržljivost R_d/(N/mm^2)	28	17	10	5

Faktor trenja. Plastomeri posjeduju dobre klizne sposobnosti za ležaje i vodilice (u kombinaciji polimerne tvari). Mana je u malenoj toplinskoj provodnosti plastomera, a time je i smanjena sposobnost odvođenja topline nastale trenjem.

Faktor trenja plastomera

Polimer	Faktor trenja μ bez podmazivanja	s podmazivanjem	Dozvoljeni tlak p/(N/mm^2)
PE	0,18 ... 0,25	0,04 ... 0,07	10
PA	0,08 ... 0,25	0,01 ... 0,08	19
PA s MoS_2	0,03 ... 0,14	0,01 ... 0,03	20

Ovisnost vlačne čvrstoće plastomera o temperaturi

Plastomer	Vlačna čvrstoća R_m/(N/mm^2) pri temperaturi ϑ/°C: –50	–25	0	25	50	75	100	125	150
PE	59	49	39	30	20	14	10	8	
PVC		88	75	59	38				
PS	83	76	69	62	49	34			
PC	88	80	72	64	58	52	40	27	12

Temperaturna uporabljivost plastomera (ϑ/°C)

PE	– 100 ... 85	POM	– 100 ... 100
PP	– 30 ... 110	PTFE	– 100 ... 165
PVC	– 45 ... 80	PA	– 100 ... 145
PS	– 100 ... 80	PC	– 100 ... 120
PMMA	– 100 ... 70	PETP	– 100 ... 100

Kemijska postojanost plastomera

Plastomer	Otpornost [1] prema: vodi	solnoj otopini	kiselinama	alkalijama	oksidaciji	otapalima
PE	+	+	+	+	(–)	(+)
PP	+	+	+	+	–	(+)
PVC	+	+	(+)	(+)	(–)	–
PS	+	+	+	+	(–)	–
SAN	+	+	0	+	–	–
ABS	+	+	0	+	–	–
PMMA	0	+	0	0	(–)	–
POM	+	+	–	0	–	(0)
PTFE	+	+	+	+	+ [2]	+
PA	0	0	–	0	–	(0)
PC	+	+	(–)	–	–	(–)
PETP	+	+	0	–	–	(0)

U zagradama su označena odstupanja od vrijednosti određene otpornosti.

[1] + – velika otpornost, 0 – mala otpornost, – – nedovoljna otpornost.

[2] PTFE je negoriv.

1 N/mm^2 = 1 MPa

Starenje obuhvaća sve promjene u sustavu tvari što ih izazivaju mehanička opterećenja, više temperature, zračenje, električna struja, kemijske tvari itd.

Kemijska razgradnja plastomera, pospješena uzročnicima starenja, može trajati više desetljeća.

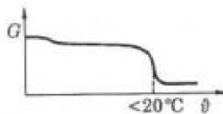
Elastomeri

Pravi elastomeri:
prirodni kaučuk s 1 ... 10 % S, PUR, SIR

Pravi elastoplastomeri:
prirodni kaučuk s više od 10 % S



Gumielastično područje počinje već pri temperaturi ispod 0 °C.



Gumielastično područje počinje već pri temperaturama do 20 °C.

Mehanička svojstva elastomera

Modul elastičnosti $E \approx 700 \ldots 1\,000$ N/mm² (≈ 700 ... 1 000 MPa)

Elastomer kaučuk	oznaka	Gustoća ϱ / kg/m³	Čvrstoća neotvr. R_m / N/mm²	Čvrstoća otvr. R_m / N/mm²	Produljenje %	Temperatura uporabe ϑ / °C
prirodni –	NR	930	22	28	600	– 45 ... 85
poliuretanski – (mekani)	PUR	1 260	20	32	450	– 100 ... 50
stiren-butadienski –	SBR	940	5	25	500	– 35 ... 110
butadienski –	BR	940	2	18	450	– 70 ... 100
butilni –	IIR	930	5	21	600	– 30 ... 120
akrilnitril-butadienski –	NBR	1 000	6	25	450	– 20 ... 110
silikonski –	SIR	1 250	1	10	250	– 100 ... 200

Prirodni kaučuk NR ima odlične elastične sposobnosti i vrlo dobru udarnu žilavost. Postojan je u vodi i kiselinama; manje postojan u mineralnim uljima i mazivima. (Plaštevi kotača za teretnjake, gumene opruge, ležaji, brtve.)

Poliuretanski kaučuk PUR izvanredno je otporan prema trošenju, dobro uporabljiv samo do temperature 50 °C. Postojan je u mineralnim

uljima, ali nepostojan u vrućoj vodi. (Valjni koluti, ležajne blazinice, brtve, amortizeri.)

Stirenbutadienski kaučuk SBR (buna) veoma je otporan prema trošenju i većim temperaturnim opterećenjima; pri dinamičkom opterećenju se jako zagrijava. (Plaštevi kotača za osobna vozila, brtve, gipke cijevi, profili, vrpce.)

Butadienski kaučuk BR (buna CB) vrlo je otporan prema trošenju pa se zato rabi za vozni sloj plašteva kotača.

Butilni kaučuk IIR vrlo je otporan na vremenske utjecaje i starenje te vrlo malo propušta plinove. (Zračnice kotača za vozila, gibljive cijevi.)

Akrilnitrilbutadienski kaučuk NBR (perbunan) postojan je u mineralnim uljima, mastima i tekućim gorivima, ali nepostojan u kloriranim ugljikovodicima. (Gibljive cijevi za benzin, membrane.)

Silikonski kaučuk SIR je izvanredno otporan na temperaturu. Postojan je u ulju i mastima, ali neotporan prema vrućoj vodi, ugljikovodicima, lužinama i kiselinama. (Brtve prehrambenih uređaja, transportne vrpce, električne izolacije.)

Duromeri

Duromeri su amorfni (kristalnih područja nema).

Temperatura omekšavanja (koja nije izrazita) leži iznad 50 °C.

Taljenja nema jer se duromeri prije raspadnu.



Mehanička svojstva duromera

Duromer smola	oznaka	Gustoća ϱ / kg/m³	Modul elastičnosti E / N/mm²	Čvrstoća vlačna R_m / N/mm²	Čvrstoća savojna R_{ms} / N/mm²	Zarez. žilav. a_k / kJ/m²	Temp. uporabe ϑ / °C
fenolna – (fenoplast)	PF	1 400	700	25	70	1,5	< 125
uratna – (aminoplast)	UF	1 500	–	30	80	1,5	< 100
melaminska –	MF	1 500	900	30	80	1,5	< 120
poliesterska –	UP	1 200	3 500	45	85	15	< 200
epoksidna –	EP	1 200	3 700	55	105	12	< 80
poliuretanska – (tvrda)	PUR	1 500	–	85	170	25	< 130

1 N/mm² = 1 MPa

Mehanička i toplinska svojstva ojačanih duromera
Svi duromeri, ojačani punilima, mehanički su znatno poboljšani.

Duromer	Dodatak stakla (pletivo)	Gustoća	Modul elast.	Čvrstoća			Toplin. rastez.	Toplin. provod.
				vlačna	savojna	tlačna		
	%	$\frac{\varrho}{kg/m^3}$	$\frac{E}{N/mm^2}$	$\frac{R_m}{N/mm^2}$	$\frac{R_{ms}}{N/mm^2}$	$\frac{R_{mt}}{N/mm^2}$	$\frac{\alpha}{1/MK}$	$\frac{\lambda}{W/(m\ K)}$
UP	25	1 350	5 000	70	120	120	35	0,15
	50	1 600	10 000	200	220	160	18	0,24
	65	1 800	19 000	300	350	280	15	0,26
	65 [1]	1 800	28 000	500	550	400	12	0,26
EP	50	1 600	10 000	220	280	220	18	0,24
	65	1 800	18 000	350	400	300	15	0,26
	65 [1]	1 800	30 000	700	800	600	12	0,26

Fenol fenoldelhidna smola (fenoplast PF) rabi se za manje opterećene predmete. (Armature, obloge kočnica, lopatična kola, izolacijski dijelovi – bakelit.)

Urea fenoldelhidna smola (aminoplast) UF služi za malo opterećene predmete (sanitarnu tehniku, električne instalacije). U svezi s prehranom je neuporabiva!

Melamin fenoldelhidna smola MF namijenjena je za predmete s većim opterećenjem, npr. za dekorativne ploče (ultrapas).

Nezasićena poliesterska smola UP polimerizira se s otvrđivačem. (Cijevi, profili, posuđe, dijelovi pokućstva, dijelovi vozila, brodice, letjelice.)

Epoksidna smola EP se također polimerizira s otvrđivačem. Rabi se za dijelove s većim zahtjevima. Ima natprosječnu adhezijsku sposobnost (araldit).

Poliuretanska smola PUR je ponajprije elektrotehnička tvar.

Posebni proizvodi od polimernih tvari

Pjenaste polimerne tvari proizvode se posebnim tehnološkim postupkom (pjenjenjem polimera u žilavo-tekućem stanju). Za njih je značajna mala gustoća (5 ... 400 kg/m^3) i sastav ćelija.

Sastav ćelija je ili s otvorenim ćelijama (s neposrednim prijelazom plinova i tekućina) ili sa zatvorenim ćelijama (pri kojima je prijelaz plinova i tekućina moguć jedino difuzijom).

Pjenaste polimerne tvari mogu biti krhko-tvrde (lome se), žilavo-tvrde (pod pritiskom se dijelom deformiraju) i meko-elastične.

[1] Uzdužni smjer pletiva.

Mehanička i toplinska svojstva pjenastih polimernih tvari

Pjenaste polimerne tvari	Gustoća	Čvrstoća		Toplinska provodnost	Uporabna temperatura
		vlačna	tlačna		
	$\frac{\varrho}{kg/m^3}$	$\frac{R_m}{N/mm^2}$	$\frac{R_m}{N/mm^2}$	$\frac{\lambda}{W/(m\ K)}$	$\frac{\vartheta}{°C}$
meko-tvrde: PF	40 ... 100	0,1 ... 0,4	0,2 ... 0,9	0,025	< 130
UF	5 ... 15	–	0,01 ... 0,05	0,03	< 90
žilavo-tvrde: PS	15 ... 30	0,1 ... 0,5	0,06 ... 0,25	0,032	70 ... 80
	30 ... 35	> 0,5	> 0,15	0,033	80 ... 85
	40 ... 60	> 0,5	> 0,5	0,033	80 ... 85
PVC	50 ... 130	0,7 ... 1,6	0,3 ... 1,1	0,038	< 60
PUR	20 ... 100	0,2 ... 1,1	0,1 ... 0,9	0,021	< 80
meko-elastične: PE [1]	25 ... 40	0,1 ... 0,2	–	0,036	< 100
	30 ... 70	0,3 ... 0,6	–	0,045	– 70 ... 85
	100 ... 200	0,8 ... 2,0	–	0,05	– 70 ... 110
PVC [1]	50 ... 70	0,3	–	0,036	– 60 ... 50
	100	0,5	–	0,041	– 60 ... 50
PUR [2]	20 ... 45	0,15	–	0,045	– 40 ... 100

Vlaknaste polimerne tvari (sintetička vlakna) proizvode se od odgovarajućih vrsta plastomera i to iz njihove taline ili otopine (suhim ili vlažnim postupkom).

Za proizvodnju vlakana dolaze u obzir ponajprije:

- polietilen, polipropilen – za užad, mreže (ribarske, plutaju na vodi)
- polistiren – za vlakna promjera ≥ 10 m
- vinilni (ko)polimeri – za kemijski otporne proizvode (filtri, zaštita)
- akrilnitrilni polimeri – za odjevne predmete (dralon, orlon ...)
- poliamidi – za odjevne predmete (perlon, najlon ...)
- poliuretani – za elastične odjevne predmete (čarape, kupaće gaćice)
- politereftalni kiseli esteri – za odjevne predmete (diolen, trevira ...), često miješamo s vunom i pamukom, za tehničku uporabu (remenje, transportne vrpce itd.)

[1] Pretežno zatvorene ćelije.
[2] Pretežno otvorene ćelije.

Normni brojevi (HRN A.A0.001 – 183)

Za brojčane vrijednosti različitih veličina (duljina, napon itd.) rabimo *normne brojeve* (prema Renardu, prijedlog ISO).

Normni brojevi su zaokružene vrijednosti članova geometrijskih redova sa stupnjevima

$\sqrt[5]{10}$, $\sqrt[10]{10}$, $\sqrt[20]{10}$, $\sqrt[40]{10}$ ili $\sqrt[80]{10}$

Svrstani su u *temeljne redove* R 5, R 10, R 20 i R 40 te *iznimni red* R 80. Njihove brojčane vrijednosti za decimalni interval od 1 do 10 predočene su u tablici.

Ograničenje reda označujemo – ako je potrebno – graničnim članom u zagradi npr.

R 5 (16 ...)
R 10 (... 400)
R 20 (2,5 ... 5)

Izvedeni redovi nastaju ako se iz nekog temeljnog ili iznimnog reda normnih brojeva uzme svaki drugi, treći, ... *n*-ti član, npr.:

R 10/3 (... 80 ...) je red koji sadrži svaki treći član iz temeljnog reda R 10, ali mora sadržavati normni broj 80.

Temeljni redovi imaju prednost pred iznimnim ili izvedenim redovima.

Ako je uporaba normnih brojeva potpuno isključena, rabe se *prilagođeni brojevi*:

1,05	2,1	2,4	3,5	4,8
1,1	2,2	2,6	3,6	5,5
1,2	2,25	3,2	3,8	7,0
1,3	2,35	3,4	4,2	

Temeljni redovi				Iznimni red	
R 5	R 10	R 20	R 40	R 80	
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,03
			1,06	1,06	1,09
		1,12	1,12	1,12	1,15
			1,18	1,18	1,22
	1,25	1,25	1,25	1,25	1,28
			1,32	1,32	1,36
		1,40	1,40	1,40	1,45
			1,50	1,50	1,55
1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,65
			1,70	1,70	1,75
		1,80	1,80	1,80	1,85
			1,90	1,90	1,95
	2,00	2,00	2,00	2,00	2,06
			2,12	2,12	2,18
		2,24	2,24	2,24	2,30
			2,36	2,36	2,43
2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,58
			2,65	2,65	2,72
		2,80	2,80	2,80	2,90
			3,00	3,00	3,07
	3,15	3,15	3,15	3,15	3,25
			3,35	3,35	3,45
		3,55	3,55	3,55	3,65
			3,75	3,75	3,87
4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,12
			4,25	4,25	4,37
		4,50	4,50	4,50	4,62
			4,75	4,75	4,87
	5,00	5,00	5,00	5,00	5,15
			5,30	5,30	5,45
		5,60	5,60	5,60	5,80
			6,00	6,00	6,15
6,30	6,30	5,30	6,30	6,30	6,50
			6,70	6,70	6,90
		7,10	7,10	7,10	7,30
			7,50	7,50	7,75
	8,00	8,00	8,00	8,00	8,25
			8,50	8,50	8,75
		9,00	9,00	9,00	9,25
			9,50	9,50	9,75
10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	

Normne duljinske izmjere u mm (HRN A.A0.010 – 1959)

0,010 ... 1 mm					1 ... 10 mm				
R 5	R 10	R 20 [1]		iz.vr. [2]	R 5	R 10	R 40 [1]		iz. vr. [2]
0,0100	0,0100	0,0100			1,00	1,00	1,00		
		0,0112	0,011				1,06	1,05	
	0,0125	0,0125	0,012				1,12	1,1	
		0,0140					1,18	1,15	
0,0160	0,0160	0,0160		0,015		1,25	1,25	1,2	
		0,0180					1,32	1,3	
	0,0200	0,0200					1,40		
		0,0224	0,022				1,50		
0,0250	0,0250	0,0250			1,60	1,60	1,60		
		0,0280					1,70		
	0,0315	0,0315	0,032	0,030			1,80		
		0,0355	0,036	0,035			1,90		
0,0400	0,0400	0,0400				2,00	2,00		
		0,0450					2,12	2,1	
	0,0500	0,0500					2,24	2,2	
		0,0560		0,055			2,36	2,35	2,4
0,0630	0,0630	0,0630		0,060	2,50	2,50	2,50		
		0,0710		0,070			2,65		2,6
	0,0800	0,0800					2,80		
		0,0900					3,00		
0,100	0,100	0,100				3,15	3,15	3,2	
		0,112	0,11				3,35	3,4	
	0,125	0,125	0,12				3,55	3,6	3,5
		0,140					3,75	3,8	
0,160	0,160	0,160		0,15	4,00	4,00	4,00		
		0,180					4,25	4,2	
	0,200	0,200					4,50		
		0,224	0,22				4,75	4,8	
0,250	0,250	0,250				5,00	5,00		
		0,280					5,30		
	0,315	0,315	0,32	0,30			5,60		5,5
		0,355	0,36	0,35			6,00		
0,400	0,400	0,400			6,30	6,30	6,30		6,0
		0,450					6,70		6,5
	0,500	0,500					7,10		7,0
		0,560		0,55			7,50		
0,630	0,630	0,630		0,60		8,00	8,00		
		0,710		0,70			8,50		
	0,800	0,800					9,00		
		0,900					9,50		
1,000	1,000	1,000			10,00	10,00	10,00		

[1] Brojevi zdesna su prilagođeni brojevi.
[2] »iz. vr.« = iznimne vrijednosti.

10 ... 100 mm					100 ... 1000 mm			
R 5	R 10	R 40 [1]		iz.vr. [2]	R 5	R 10	R 40 [1]	
10	10	10			100	100	100	
		10,6	10,5				106	105
		11,2	11				112	110
		11,8	11,5				118	115
	12,5	12,5	12			125	125	120
		13,2	13				132	130
		14					140	
		15					150	
16	16	16			160	160	160	
		17					170	
		18					180	
		19					190	
	20	20				200	200	
		21,2	21				212	210
		22,4	22				224	220
		23,6	23,5	24			236	235
25	25	25			250	250	250	
		26,5		26			265	
		28					280	
		30					300	
	31,5	31,5	32			315	315	320
		33,5	34				335	340
		35,5	36	35			355	360
		37,5	38				375	380
40	40	40			400	400	400	
		42,5	42				425	420
		45					450	
		47,5	48				475	480
	50	50				500	500	
		53					530	
		56		55			560	
		60					600	
60	63	63			630	630	630	
		67		65			670	
		71		70			710	
		75					750	
	80	80				800	800	
		85					850	
		90					900	
		95					950	
100	100	100			1000	1000	1000	

[1] Brojevi zdesna su prilagođeni brojevi.
[2] »iz. vr.« = iznimne vrijednosti.

SUSTAV ISO ZA GRANIČNE IZMJERE I DOSJEDE

Izrazi za tolerancije i dosjede, a također i za tolerancijske oznake (simbole), usklađeni su s međunarodnom normom ISO 286 (studeni 1990). Vrijede prije svega za glatke kovinske izradke s valjkastim spojnim plohama (npr. provrt i rukavac); tolerancijski sustav može se rabiti i za nevaljkaste dijelove, tj. za izradke s paralelnim spojnim plohama (npr. širina utora i debljina pera).

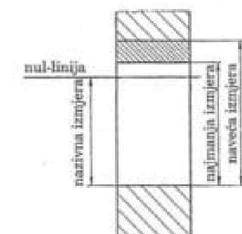
Izmjere

Izmjera je izmjerena vrijednost fizikalne veličine »duljine« za odmjeravanje različitih vrijednosti te veličine.

Temeljna temperatura pri određivanju izmjera u sustavu graničnih izmjera i dosjeda ISO – *referentna temperatura* – je 20 °C.

Nazivna izmjera je izmjera od koje dobivamo granične izmjere ako joj dodamo gornje ili donje odstupanje izmjere (slika). Nazivna izmjera može biti cijeli ili decimalni broj.

Granične izmjere su ukupno dopuštene izmjere oblikovanog elementa, među kojima – uključujući i njih same – mora biti stvarna izmjera.



Stvarna izmjera je izmjera, koju dobivamo mjerenjem (s takvom točnošću, da smijemo možebitnu pogrešku mjerenja zanemariti).

Najveća izmjera je najveća dopuštena izmjera nekog oblikovanog elementa (slika).

Najmanja izmjera je najmanja dopuštena izmjera nekog oblikovanog elementa (slika).

Sustav graničnih izmjera je sustav normiranih tolerancija i odstupanja izmjera.

Nul-linija je pri grafičkom prikazu graničnih izmjera i dosjeda crta, koja odgovara nazivnoj izmjeri, na koju se nanose odstupanja izmjera i tolerancija (v. sl. na str. 545).

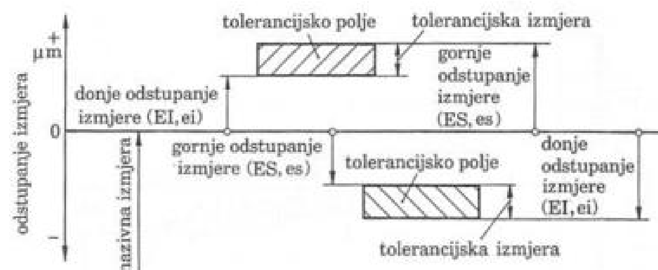
Dva su granična odstupanja izmjera:

– *gornje odstupanje izmjere* je algebarska razlika između najveće izmjere i pripadne joj nazivne izmjere (v. sl. na str. 545); označuje se s oznakom ES za provrte i es za rukavce.

– *donje odstupanje izmjere* je algebarska razlika između najmanje izmjere i pripadne joj nazivne izmjere (v. sl. na str. 545); označuje se s oznakama EI za provrte i ei za rukavce.

Temeljno odstupanje izmjere je u sustavu graničnih izmjera i dosjeda ISO takvo odstupanje izmjere koje se od nul-linije proteže do tolerancijskog polja (v. sl. na str. 545). To može biti gornje ili donje odstupanje izmjere; uglavnom, radi se o odstupanju izmjere koje je najbliže nul-liniji.

Tolerancijska izmjera je razlika između najveće i najmanje izmjere, ali također i razlika između gornjeg i donjeg odstupanja izmjere. Tolerancija je apsolutna vrijednost i zato je bez predznaka.



Temeljna tolerancija (IT)[1] je u sustavu graničnih izmjera i dosjeda ISO svaka tolerancija koja spada u sustav.

Red temeljnih tolerancija je u sustavu graničnih izmjera i dosjeda ISO, skupina tolerancija s točno priređenim tolerancijama za svaku nazivnu izmjeru. Sustav sadrži 20 stupnjeva temeljnih tolerancija s oznakama IT01, IT0, i IT1 do IT18 za područja nazivnih izmjera 0 do zaključno 500 mm i 18 stupnjeva temeljnih tolerancija s oznakama IT1 do IT18 za područja nazivnih izmjera iznad 500 do zaključno 3150 mm.

Tolerancijsko polje u grafičkom prikazu predstavlja područje između linija koje predstavljaju najveću i najmanju izmjeru. Tolerancijsko polje je određeno s veličinom tolerancije i njenom udaljenošću od nul-linije (slika).

Tolerancijski razred je naziv za spoj slova temeljnog odstupanja izmjere sa brojem stupnja temeljne tolerancije, npr. H7 (provrt), h7 (rukavac).

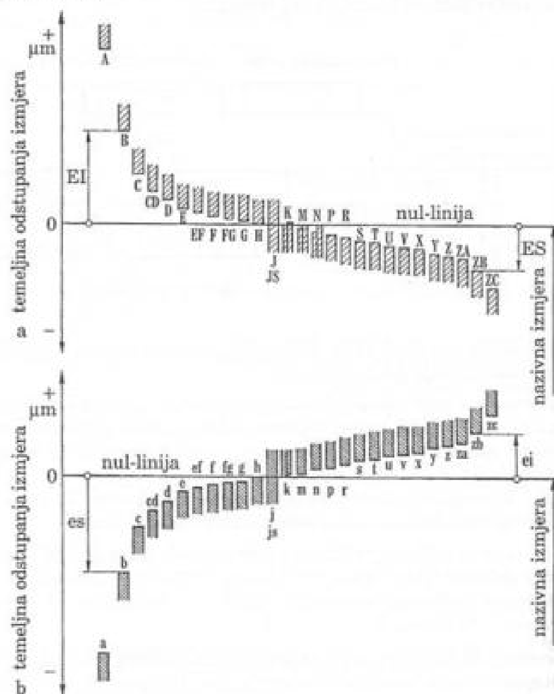
Tolerancijska izmjera sastoji se iz nazivne izmjere i oznake odgovarajućeg tolerancijskog razreda (npr. 32 H7, 80 js15, 100 g6) ili iz nazivne izmjere i odstupanja

$$\left(\text{npr. } 100^{-0,012}_{-0,034};\quad 50^{\;0}_{-0,016};\quad 80^{+0,034}_{+0,012};\quad 60^{+0,016}_{\;0}\right).$$

Položaj tolerancijskog polja u odnosu na nul-liniju je funkcija nazivne izmjere; za provrte se označava s velikim slovom/slovima (A ... ZC), a za rukavac s malim slovom/slovima (a ... zc) (v. sliku na str. 546).

1) Internationale Toleranz.

Da bi se izbjegao nesporazum, nisu uporabljena sljedeća slova: I, i, L, l, O, o, Q, q, W, w.



Tolerancijski koeficijent i u µm je funkcija nazivne izmjere do zaključno 500 mm, *tolerancijski koeficijent I* u µm je pak funkcija nazivne izmjere iznad 500 mm do zaključno 3150 mm. Izračunavamo ih po formulama

$$i = 0{,}45\sqrt[3]{D} + 0{,}001\,D \qquad I = 0{,}004\,D + 2{,}1 \quad \mu m$$

pri čemu je D geometrijska sredina graničnog područja nazivnih izmjera u mm.

Nazivna područja izmjera su podijeljena u glavna i lokalna područja. Lokalna područja se rabe samo u iznimnim (specijalnim) slučajevima kod računanja temeljnih tolerancija i temeljnih odstupanja izmjera a do c i r do zc za rukavce, a isto tako i A do C i R do ZC za provrte.

Vrijednosti temeljnih tolerancija i temeljnih odstupanja izmjere za svako područje nazivnih izmjera računaju se iz geometrijske srednje vrijednosti (D) graničnih područja (D_i i D_s)

$$D = \sqrt{D_i\,D_s}$$

Za prvo područje nazivnih izmjera (do zaključno 3 mm) uzimamo geometrijsku sredinu D između 1 i 3 mm; zato je $D = 1{,}732$ mm.

Područja nazivnih izmjera Vrijednosti u mm

Nazivne izmjere do zaključno 500 mm				Nazivne izmjere od 500 do zaključno 3150 mm			
Glavno područje		Podpodručja [1]		Glavno područje		Podpodručja [2]	
od	do	od	do	od	do	od	do
–	3	Za ovo područje nije predviđena finija podjela		500	630	500 560	560 630
3	6			630	800	630 710	710 800
6	10			800	1 000	800 900	900 1 000
10	18	10 14	14 18	1 000	1 250	1 000 1 120	1 120 1 250
18	30	18 24	24 30	1 250	1 600	1 250 1 400	1 400 1 600
30	50	30 40	40 50	1 600	2 000	1 600 1 800	1 800 2 000
50	80	50 65	65 80	2 000	2 500	2 000 2 240	2 240 2 500
80	120	80 100	100 120	2 500	3 150	2 500 2 800	2 800 3 150
120	180	120 140 160	140 160 180				
180	250	180 200 225	200 225 250				
250	315	250 280	280 315				
315	400	315 355	355 400				
400	500	400 450	450 500				

[1] U iznimnim slučajevima za odstupanje izmjera a do c i r do zc ili A do C i R do ZC (v. tablicu na str. 550 i 552).

[2] Za odstupanje izmjera r do u i R do U v. tablicu na str. 550 i 552.

Vrijednosti temeljnih tolerancija za stupnjeve temeljnih tolerancija IT01 i IT0

Nazivne izmjere mm		Stupanj temeljne tolerancije IT01	IT0
od	do	Temeljne tolerancije µm	
–	3	0,3	0,5
3	6	0,4	0,6
6	10	0,4	0,6
10	18	0,5	0,8
18	30	0,6	1
30	50	0,6	1
50	80	0,8	1,2
80	120	1	1,5
120	180	1,2	2
180	250	2	3
250	315	2,5	4
315	400	3	5
400	500	4	6

Za uočiti je da za IT2, IT3, i IT4 nije raspoloživa ni jedna formula. Vrijednosti za te stupnjeve temeljnih tolerancija mogu se približno dobiti članovima geometrijskog reda između vrijednosti za IT1 i IT5.

Za IT1 vrijedi formula

$$i = 0{,}8 + 0{,}02\,D.$$

Temeljno odstupanje izmjere pri rukavcu je načelno ono koje je najbliže granici, odnosno nul-liniji, tj. gornje odstupanje izmjere za rukavce koji imaju tolerancijska polja a do h i donje odstupanje izmjere za tolerancijska polja k do zc.

Izuzimamo rukavce s tolerancijskim poljima j i js – oni ustvari nemaju temeljno odstupanje izmjere – vrijednost im je temeljnog odstupanja izmjere neovisna o izboru tolerancijskog stupnja.

Temeljno odstupanje izmjere za provrt je, glede nul-linije, jednako temeljnom odstupanju izmjere za rukavac s istim oznakama. To pravilo ne vrijedi: za temeljno odstupanje izmjere N stupnjeva temeljnih tolerancija IT9 do IT16 nazivnih izmjera iznad 3 mm do 500 mm; tu je temeljno odstupanje izmjere ništica i za temeljna odstupanja izmjera pri dosjedima u dosjednom sustavu rukavca i provrta za nazivne izmjere iznad 3 mm do 500 mm, pri kojima je provrt određene temeljne tolerancije povezan s rukavcem sljedeće finije temeljne tolerancije (npr. H7/h6) i pritom dosjed mora biti točno iste zračnosti i nadmjere.

[1] Vrijednosti za stupanj temeljne tolerancije IT01 i IT0 za nazivne izmjere do uključivo 500 mm predočene su u tablici na str. 549.

[2] Vrijednosti za stupnjeve temeljnih tolerancija od IT1 do zaključno IT5 te za nazivne izmjere preko 500 mm rabiti samo za pokusne svrhe.

[3] Stupnjevi temeljnih tolerancija IT14 do zaključno IT18 ne smiju se rabiti za vrijednosti do uključivo 1 mm.

Vrijednosti temeljnih tolerancija izračunavamo s koeficijentima tolerancije i i I po tablici:

Nazivna izmjera u mm		IT1[1]	IT2[2]	IT3[1]	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
od	do	Formula za izračun temeljne tolerancije (rezultati u µm)																	
–	500	–	–	–	–	7 i	10 i	16 i	25 i	40 i	64 i	100 i	160 i	250 i	400 i	640 i	1000 i	1600 i	2500 i
500	3150	2 I	2,7 I	3,7 I	5 I	7 I	10 I	16 I	25 I	40 I	64 I	100 I	160 I	250 I	400 I	640 I	1000 I	1600 I	2500 I

Vrijednosti temeljnih tolerancija za stupnjeve temeljnih tolerancija IT1 do IT18 za nazivne izmjere do 3150 mm

Nazivna izmjera u mm		IT1[2]	IT2[2]	IT3[2]	IT4[2]	IT5[2]	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14[3]	IT15[3]	IT16[3]	IT17[3]	IT18[3]
od	do	Temeljne tolerancije µm											mm						
–	3[3]	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
3	6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	2	3	5	8	13	19	30	45	74	120	190	0,3	0,45	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7
500	630[2]	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11
630	800[2]	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5	8	12,5
800	1000[2]	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9	14
1000	1250[2]	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1,05	1,65	2,6	4,2	6,6	10,5	16,5
1250	1600[2]	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5	7,8	12,5	19,5
1600	2000[2]	18	25	35	45	65	92	150	230	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6	9,2	15	23
2000	2500[2]	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28
2500	3150[2]	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2,1	3,3	5,4	8,6	13,5	21	33

Napomene [1] [2] [3] na str. 548.

Brojčane vrijednosti temeljnih odstupanja izmjera za rukavce

Nazivna izmjera u mm		Vrijednost temeljnog odstupanja izmjera, gornje odstupanje mjere es															
		Svi stupnjevi temeljnih tolerancija													IT5 i IT6	IT7	IT8
od	do	a[1]	b[1]	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js[2]		j		
-	3[1]	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	Odstupanje = ±IT $n/2$ pri čemu je n brojčana vrijednost IT.		-2	-4	-6
3	6	-270	-140	-70	-46	-30	-20	-14	-10	-6	-4	0			-2	-4	
6	10	-280	-150	-80	-56	-40	-25	-18	-13	-8	-5	0			-2	-4	
10	14	-290	-150	-95		-50	-32		-16		-6	0			-3	-6	
14	18																
18	24	-300	-160	-110		-65	-40		-20		-7	0			-4	-8	
24	30																
30	40	-310	-170	-120		-80	-50		-25		-9	0			-5	-10	
40	50	-320	-180	-130													
50	65	-340	-190	-140		-100	-60		-30		-10	0			-7	-12	
65	80	-360	-200	-150													
80	100	-380	-220	-170		-120	-72		-36		-12	0			-9	-15	
100	120	-410	-240	-180													
120	140	-460	-260	-200		-145	-85		-43		-14	0			-11	-18	
140	160	-520	-280	-210													
160	180	-580	-310	-230													
180	200	-660	-340	-240		-170	-100		-50		-15	0			-13	-21	
200	225	-740	-380	-250													
225	250	-820	-420	-280													
250	280	-920	-480	-300		-190	-110		-56		-17	0			-16	-26	
280	315	-1050	-540	-330													
315	355	-1200	-600	-360		-210	-125		-62		-18	0			-18	-28	
355	400	-1350	-680	-400													
400	450	-1500	-760	-440		-230	-135		-68		-20	0			-20	-32	
450	500	-1650	-840	-480													
500	560					-260	-145		-76		-22	0					
560	630																
630	710					-290	-160		-80		-24	0					
710	800																
800	900					-320	-170		-86		-26	0					
900	1000																
1000	1120					-350	-195		-98		-28	0					
1120	1250																
1250	1400					-390	-220		-110		-30	0					
1400	1600																
1600	1800					-430	-240		-120		-32	0					
1800	2000																
2000	2240					-480	-260		-130		-34	0					
2240	2500																
2500	2800					-520	-290		-145		-38	0					
2800	3150																

[1] Temeljno odstupanje a i b se ne smije rabiti za nazivne izmjere do uključivo 1 mm.

[2] Kod tolerancijskih razreda js 7 do js 11 može se brojčana vrijednost IT n, ako je neparna brojka zaokružiti na prvi donji parni, tako da je dobiveno odstupanje izmjere, tj. ± IT $n/2$ cijela brojka u µm.

Vrijednost temeljnih odstupanja izmjera u µm

IT4 do IT7	do IT3 i od IT7	Vrijednost temeljnog odstupanja izmjera donje odstupanje izmjere ei svi stupnjevi temeljnih tolerancija													
k		m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
0	0	+2	+4	+6	+10	+14		+18		+20		+26	+32	+40	+60
+1	0	+4	+8	+12	+15	+19		+23		+28		+35	+42	+50	+80
+1	0	+6	+10	+15	+19	+23		+28		+34		+42	+52	+67	+97
+1	0	+7	+12	+18	+23	+28		+33		+40		+50	+64	+90	+130
									+39	+45		+60	+77	+108	+150
+2	0	+8	+15	+22	+28	+35		+41	+47	+54	+63	+73	+98	+136	+188
							+41	+48	+55	+64	+75	+88	+118	+160	+218
+2	0	+9	+17	+26	+34	+43	+48	+60	+68	+80	+94	+112	+148	+200	+274
							+54	+70	+81	+97	+114	+136	+180	+242	+325
+2	0	+11	+20	+32	+41	+53	+66	+87	+102	+122	+144	+172	+226	+300	+405
					+43	+59	+75	+102	+120	+146	+174	+210	+274	+360	+480
+3	0	+13	+23	+37	+51	+71	+91	+104	+146	+178	+214	+258	+335	+445	+585
					+54	+79	+104	+144	+172	+210	+254	+310	+400	+525	+690
+3	0	+15	+27	+43	+63	+92	+122	+170	+202	+248	+300	+365	+470	+620	+800
					+65	+100	+134	+190	+228	+280	+340	+415	+535	+700	+900
					+68	+108	+146	+210	+252	+310	+380	+465	+600	+780	+1000
+4	0	+17	+31	+50	+77	+122	+166	+236	+284	+350	+425	+520	+670	+880	+1150
					+80	+130	+180	+258	+310	+385	+470	+575	+740	+960	+1250
					+84	+140	+196	+284	+340	+425	+520	+640	+820	+1050	+1350
+4	0	+20	+34	+56	+94	+158	+218	+315	+385	+475	+580	+710	+920	+1200	+1550
					+98	+170	+240	+350	+425	+525	+650	+790	+1000	+1300	+1700
+4	0	+21	+37	+62	+108	+190	+268	+390	+475	+500	+730	+900	+1150	+1500	+1900
					+114	+208	+294	+435	+530	+660	+820	+1000	+1300	+1650	+2100
+5	0	+23	+40	+68	+126	+232	+330	+490	+505	+740	+920	+1100	+1450	+1850	+2400
					+132	+252	+360	+540	+660	+820	+1000	+1250	+1600	+2100	+2600
0	0	+26	+44	+78	+150	+280	+400	+600							
					+155	+310	+450	+660							
0	0	+30	+50	+88	+175	+340	+500	+740							
					+185	+380	+560	+840							
0	0	+34	+56	+100	+210	+430	+620	+940							
					+220	+470	+680	+1050							
0	0	+40	+66	+120	+250	+520	+780	+1150							
					+260	+580	+840	+1300							
0	0	+48	+78	+140	+300	+640	+960	+1450							
					+330	+720	+1050	+1600							
0	0	+58	+92	+170	+370	+820	+1200	+1850							
					+400	+920	+1350	+2000							
0	0	+68	+110	+195	+440	+1000	+1500	+2300							
					+460	+1100	+1650	+2500							
0	0	+76	+135	+240	+550	+1250	+1900	+2900							
					+580	+1400	+2100	+3200							

Brojčane vrijednosti temeljnih odstupanja izmjera za provrte

Nazivna izmjera u mm od	do	Vrijednosti temeljnog odstupanja izmjere, donje odstupanje izmjere EI – Svi stupnjevi temeljnih odstupanja: A[1]	B[1]	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H	JS[2]	J IT6	J IT7	J IT8	K[3] do IT8	K[3] od IT8	M[3,4] do IT8	M[3,4] od IT8
–	3	+270	+140	+60	+34	+20	+14	+10	+6	+4	+2	0	Odstupanje = ±IT *n*/2 pri čemu je *n* brojčana vrijednost IT.	+2	+4	+6	0	0	−2+Δ	−2
3	6	+270	+140	+70	+46	+30	+20	+14	+10	+6	+4	0		+5	+6	+10	−1+Δ		−4+Δ	−4
6	10	+280	+150	+80	+56	+40	+25	+18	+13	+8	+5	0		+5	+8	+12	−1+Δ		−6+Δ	−6
10	14	+290	+150	+95		+50	+32		+16		+6	0		+6	+10	+15	−1+Δ		−7+Δ	−7
14	18																			
18	24	+300	+160	+110		+65	+40		+20		+7	0		+8	+12	+15	−2+Δ		−8+Δ	−8
24	30																			
30	40	+310	+170	+120		+80	+50		+25		+9	0		+10	+14	+24	−2+Δ		−9+Δ	−9
40	50	+320	+180	+130																
50	65	+340	+190	+140		+100	+60		+30		+10	0		+13	+18	+28	−2+Δ		−11+Δ	−11
65	80	+360	+200	+150																
80	100	+380	+220	+170		+120	+72		+36		+12	0		+16	+22	+34	−3+Δ		−13+Δ	−13
100	120	+410	+240	+180																
120	140	+460	+260	+200		+145	+85		+43		+14	0		+18	+26	+41	−3+Δ		−15+Δ	−15
140	160	+520	+280	+210																
160	180	+580	+310	+230																
180	200	+660	+340	+240		+170	+100		+50		+15	0		+22	+30	+47	−4+Δ		−17+Δ	−17
200	225	+740	+380	+260																
225	250	+820	+420	+280																
250	280	+920	+480	+300		+190	+110		+56		+17	0		+25	+36	+55	−4+Δ		−20+Δ	−20
280	315	+1050	+540	+330																
315	355	+1200	+600	+360		+210	+125		+62		+18	0		+29	+39	+60	−4+Δ		−21+Δ	−21
355	400	+1350	+680	+400																
400	450	+1500	+760	+440		+230	+135		+68		+20	0		+33	+43	+66	−5+Δ		−23+Δ	−23
450	500	+1650	+840	+480																
500	560					+260	+145		+76		+22	0					0		−26	
560	630																			
630	710					+290	+160		+80		+24	0					0		−30	
710	800																			
800	900					+320	+170		+86		+26	0					0		−34	
900	1000																			
1000	1120					+350	+195		+98		+28	0					0		−40	
1120	1250																			
1250	1400					+390	+220		+110		+30	0					0		−48	
1400	1600																			
1600	1800					+430	+240		+120		+32	0					0		−58	
1800	2000																			
2000	2240					+480	+260		+130		+34	0					0		−68	
2240	2500																			
2500	2800					+520	+290		+145		+38	0					0		−76	
2800	3150																			

1) Temeljno se odstupanje A i B ne smije rabiti za nazivne izmjere do isključivo 1 mm.

2) Kod tolerancijskih razreda JS7 do JS11 može se brojčana vrijednost IT *n* ako je neparna brojka zaokružiti nadolje na prvu parnu tako da je dobiveno odstupanje izmjere, to jest ± IT *n*/2, cijela brojka predočena u µm.

3) Da bi se dobile K, M i N za stupnjeve temeljnih tolerancija do uključivo IT8 i odstupanja izmjera P do ZC za stupanj temeljne tolerancije do uključivo IT7 moraju se vrijednosti Δ uzeti iz desnih stupaca tablice na strani 553.

Vrijednost temeljnih odstupanja izmjera u µm

N[3,5] do IT8	N[3,5] od IT8	Vrijednosti temeljnog odstupanja izmjere, gornje odstupanje izmjere ES: P do ZC do IT7	Temeljne tolerancije iznad IT7: P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC	Vrijednosti za Δ – Stupanj temeljne tolerancije: IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8
−4	−4	Vrijednosti stupnjeva temeljnih tolerancija od IT7 povećati za Δ	−6	−10	−14		−18		−20		−26	−32	−40	−60	0	0	0	0	0	0
−8+Δ	0		−12	−15	−19		−23		−28		−35	−42	−50	−80	1	1.5	1	3	4	6
−10+Δ	0		−15	−19	−23		−28		−34		−42	−52	−67	−97	1	1.5	2	3	6	7
−12+Δ	0		−18	−23	−28		−33		−40		−50	−64	−90	−130	1	2	3	3	7	9
								−39	−45		−60	−77	−108	−150						
−15+Δ	0		−22	−28	−35		−41	−47	−54	−63	−73	−98	−136	−188	1.5	2	3	4	8	12
						−41	−48	−55	−64	−75	−88	−118	−160	−218						
−17+Δ	0		−26	−34	−43	−48	−60	−68	−80	−94	−112	−148	−200	−274	1.5	3	4	5	9	14
						−54	−70	−81	−97	−114	−136	−180	−242	−325						
−20+Δ	0		−32	−41	−53	−66	−87	−102	−122	−144	−172	−226	−300	−405	2	3	5	6	11	16
				−43	−59	−75	−102	−120	−146	−174	−210	−274	−360	−480						
−23+Δ	0		−37	−51	−71	−91	−124	−146	−178	−214	−258	−335	−445	−585	2	4	5	7	13	19
				−54	−79	−104	−144	−172	−210	−254	−310	−400	−525	−690						
−27+Δ	0		−43	−63	−92	−122	−170	−202	−248	−300	−365	−470	−620	−800	3	4	6	7	15	23
				−65	−100	−134	−190	−228	−280	−340	−415	−535	−700	−900						
				−68	−108	−146	−210	−252	−310	−380	−465	−600	−780	−1000						
−31+Δ	0		−50	−77	−122	−166	−236	−284	−350	−425	−520	−670	−880	−1150	3	4	6	9	17	26
				−80	−130	−180	−258	−310	−385	−470	−575	−740	−960	−1250						
				−84	−140	−196	−284	−340	−425	−520	−640	−820	−1050	−1350						
−34+Δ	0		−56	−94	−158	−218	−315	−385	−475	−580	−710	−920	−1200	−1550	4	4	7	9	20	29
				−98	−170	−240	−350	−425	−525	−650	−790	−1000	−1300	−1700						
−37+Δ	0		−62	−108	−190	−268	−390	−475	−590	−730	−900	−1150	−1500	−1900	4	5	7	11	21	32
				−114	−208	−294	−435	−530	−660	−820	−1000	−1300	−1650	−2100						
−40+Δ	0		−68	−126	−232	−330	−490	−595	−740	−920	−1100	−1450	−1850	−2400	5	5	7	13	23	34
				−132	−252	−360	−540	−660	−820	−1000	−1250	−1600	−2100	−2600						
−44			−78	−150	−280	−400	−600													
				−155	−310	−450	−660													
−50				−175	−340	−500	−740													
				−185	−380	−560	−840													
−56				−210	−430	−620	−940													
				−220	−470	−680	−1050													
−66				−250	−520	−780	−1150													
				−260	−580	−840	−1300													
−78				−300	−640	−960	−1450													
				−330	−720	−1050	−1600													
−92				−370	−820	−1200	−1850													
				−400	−920	−1350	−2000													
−110				−440	−1000	−1500	−2300													
				−460	−1100	−1650	−2500													
−135				−550	−1250	−1900	−2900													
				−580	−1400	−2100	−3200													

Primjer:
K7 u području 18 do 30 mm: Δ = 8 µm pa je ES = −2 + 8 = + 6 µm
S6 u području 18 do 30 mm: Δ = 4 µm pa je ES = −35 + 4 = −31 µm.

4) Posebnost: za tolerancijski razred M6 u području 250 do 315 mm je ES = −9 µm (umjesto −11 µm)

5) Odstupanja izmjera N za stupnjeve temeljnih tolerancija od IT8 ne smije se rabiti za nazivne mjere do uključivo 1 mm.

Vrijednosti odstupanja rukavaca u μm (HRN M.A1.150 ... 158 - 1968)

Nazivna izmjera (mm)	a11	c11	d9	e8	f7	g6	h6	h8	h9	h11
... 3	-270 -330	-60 -120	-20 -45	-14 -28	-6 -16	-2 -8	0 -6	0 -14	0 -25	0 -60
3) ... 6	-270 -345	-70 -145	-30 -60	-20 -38	-10 -22	-4 -12	0 -8	0 -18	0 -30	0 -75
6) ... 10	-280 -370	-80 -170	-40 -76	-25 -47	-13 -28	-5 -14	0 -9	0 -22	0 -36	0 -90
10) ... 18	-290 -400	-95 -205	-50 -93	-32 -59	-16 -34	-6 -17	0 -11	0 -27	0 -43	0 -110
18) ... 30	-300 -430	-110 -240	-65 -117	-40 -73	-20 -41	-7 -20	0 -13	0 -33	0 -52	0 -130
30) ... 40	-310 -470	-120 -280	-80 -142	-50 -89	-25 -50	-9 -25	0 -16	0 -39	0 -62	0 -160
40) ... 50	-320 -480	-130 -290								
50) ... 65	-340 -530	-140 -330	-100 -174	-60 -106	-30 -60	-10 -29	0 -19	0 -46	0 -74	0 -190
65) ... 80	-340 -550	-150 -340								
80) ... 100	-380 -600	-170 -390	-120 -207	-72 -126	-36 -71	-12 -34	0 -22	0 -54	0 -87	0 -220
100) ... 120	-410 -630	-180 -400								
120) ... 140	-460 -710	-200 -450	-145 -245	-85 -148	-43 -83	-14 -39	0 -25	0 -63	0 -100	0 -250
140) ... 160	-520 -770	-210 -460								
160) ... 180	-580 -830	-230 -480								
180) ... 200	-660 -950	-240 -530	-170 -285	-100 -172	-50 -96	-15 -44	0 -29	0 -72	0 -115	0 -290
200) ... 225	-740 -1030	-260 -550								
225) ... 250	-820 -1110	-280 -570								
250) ... 280	-920 -1240	-300 -620	-190 -320	-110 -191	-56 -108	-17 -49	0 -32	0 -81	0 -130	0 -320
280) ... 315	-1050 -1370	-330 -650								
315) ... 355	-1200 -1560	-360 -720	-210 -350	-125 -214	-62 -119	-18 -54	0 -36	0 -89	0 -140	0 -360
355) ... 400	-1350 -1710	-400 -760								
400) ... 450	-1500 -1900	-440 -840	-230 -385	-135 -232	-68 -131	-20 -60	0 -40	0 -97	0 -155	0 -400
450) ... 500	-1650 -2050	-480 -880								

Vrijednosti odstupanja rukavaca u μm (HRN M.A1.150 ... 158 - 1968) (*konac*)

Nazivna izmjera (mm)	j6	k6	n6	r6	s6	u8	x8
... 3	+4 -2	+6 0	+10 +4	+16 +10	+27 +19	+32 +18	+34 +20
3) ... 6	+6 -2	+9 +1	+16 +8	+23 +15	+20 +14	+41 +23	+46 +28
6) ... 10	+7 -2	+10 +1	+19 +10	+28 +19	+32 +23	+50 +28	+56 +34
10) ... 14	+8 -3	+12 +1	+23 +12	+34 +23	+39 +28	+60 +33	+67+40
14) ... 18							+72+45
18) ... 24	+9 -4	+15 +2	+28 +15	+41 +28	+48 +35	+74+41	+87+54
24) ... 30						+81+48	+97+64
30) ... 40	+11 -5	+18 +2	+33 +17	+50 +34	+59 +43	+99 +60	+119 +80
40) ... 50						+109 +70	+136 +97
50) ... 65	+12 -7	+21 +2	+39 +20	+60 +41	+72 +53	+133 +87	+168 +122
65) ... 80				+62 +43	+78 +59	+148 +102	+192 +146
80) ... 100	+13 -9	+25 +3	+45 +23	+73 +51	+93 +71	+178 +124	+232 +178
100) ... 120				+76 +54	+101 +79	+198 +144	+264 +210
120) ... 140	+14 -11	+28 +3	+52 +27	+88 +63	+117 +92	+233 +170	+311 +248
140) ... 160				+90 +65	+125 +100	+253 +190	+343 +280
160) ... 180				+93 +68	+133 +108	+273 +210	+373 +310
180) ... 200	+16 -13	+33 +4	+60 +31	+106 +77	+151 +122	+308 +236	+422 +350
200) ... 225				+109 +80	+159 +130	+330 +258	+457 +385
225) ... 250				+113 +84	+169 +140	+356 +284	+497 +425
250) ... 280	+16 -16	+36 +4	+66 +34	+126 +94	+190 +158	+396 +315	+556 +475
280) ... 315				+130 +98	+202 +170	+431 +350	+606 +525
315) ... 355	+18 -18	+40 +4	+73 +37	+144 +108	+226 +190	+479 +390	+679 +590
355) ... 400				+150 +114	+244 +208	+524 +435	+749 +660
400) ... 450	+20 -20	+45 +5	+80 +40	+166 +126	+272 +232	+587 +490	+837 +740
450) ... 500				+172 +132	+292 +252	+637 +540	+917 +820

Vrijednost odstupanja provrta u μm (HRN M.A1.170 ... 177 – 1968)

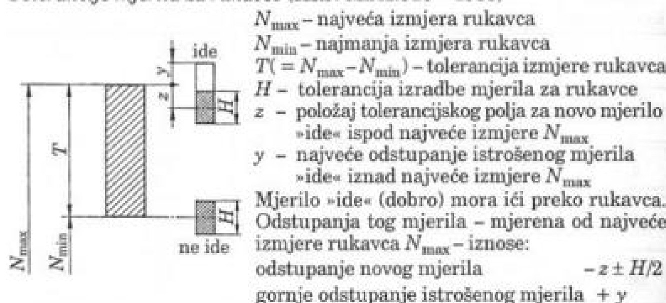
Nazivna izmjera (mm)	A11	C11	D10	E9	F8	G7
... 3	+330 +270	+120 +60	+60 +20	+39 +14	+20 +6	+12 +2
3) ... 6	+345 +270	+145 +70	+78 +30	+50 +20	+28 +10	+16 +4
6) ... 10	+370 +280	+170 +80	+98 +40	+61 +25	+35 +13	+20 +5
10) ... 18	+400 +290	+205 +95	+120 +50	+75 +32	+43 +16	+24 +6
18) ... 30	+430 +300	+240 +110	+149 +65	+92 +40	+53 +20	+28 +7
30) ... 40	+470 +310	+280 +120	+180 +80	+112 +50	+64 +25	+34 +9
40) ... 50	+480 +320	+290 +130				
50) ... 65	+530 +340	+330 +140	+220 +100	+134 +60	+76 +30	+40 +10
65) ... 80	+550 +360	+340 +150				
80) ... 100	+600 +380	+390 +170	+260 +120	+159 +72	+90 +36	+47 +12
100) ... 120	+630 +410	+400 +180				
120) ... 140	+710 +460	+450 +200	+305 +145	+185 +85	+106 +43	+54 +14
140) ... 160	+770 +520	+460 +210				
160) ... 180	+830 +580	+480 +230				
180) ... 200	+950 +660	+530 +240	+355 +170	+215 +100	+122 +150	+61 +15
200) ..225	+1030 +740	+550 +260				
225) ... 250	+1110 +820	+570 +280				
250) ... 280	+1240 +920	+620 +300	+400 +190	+240 +110	+137 +56	+69 +17
280) ... 315	+1370 +1050	+650 +330				
315) ... 355	+1560 +1200	+720 +360	+440 +210	+265 +125	+151 +62	+75 +18
355) ... 400	+1710 +1350	+760 +400				
400) ... 450	+1900 +1500	+840 +440	+480 +230	+290 +135	+165 +68	+83 +20
450) ... 500	+2050 +1650	+880 +480				

Vrijednosti odstupanja provrta u μm (HRN M.A1.170 ... 177 – 1968) *(konac)*

Nazivna izmjera (mm)	H6	H7	H8	H9	H11
... 3	+6 0	+10 0	+14 0	+25 0	+60 0
3) ... 6	+8 0	+12 0	+18 0	+30 0	+75 0
6) ... 10	+9 0	+15 0	+22 0	+36 0	+90 0
10) ... 18	+11 0	+18 0	+27 0	+43 0	+110 0
18) ... 30	+13 0	+21 0	+33 0	+52 0	+130 0
30) ... 40	+16 0	+25 0	+39 0	+62 0	+160 0
40) ... 50					
50) ... 65	+19 0	+30 0	+46 0	+74 0	+190 0
65) ... 80					
80) ... 100	+22 0	+35 0	+54 0	+87 0	+220 0
100) ... 120					
120) ... 140	+25 0	+40 0	+63 0	+100 0	+250 0
140) ... 160					
160) ... 180					
180) ... 200	+29 0	+46 0	+72 0	+115 0	+290 0
200) ... 225					
225) ... 250					
250) ... 280	+32 0	+52 0	+81 0	+130 0	+320 0
280) ... 315					
315) ... 355	+36 0	+57 0	+89 0	+140 0	+360 0
355) .. 400					
400) ... 450	+40 0	+63 0	+97 0	+115 0	+400 0
450) ... 500					

Tolerancije mjerila

Tolerancije mjerila za rukavce (HRN M.A1.310 – 1983)



N_{max} – najveća izmjera rukavca
N_{min} – najmanja izmjera rukavca
$T (= N_{max} - N_{min})$ – tolerancija izmjere rukavca
H – tolerancija izradbe mjerila za rukavce
z – položaj tolerancijskog polja za novo mjerilo »ide« ispod najveće izmjere N_{max}
y – najveće odstupanje istrošenog mjerila »ide« iznad najveće izmjere N_{max}

Mjerilo »ide« (dobro) mora ići preko rukavca. Odstupanja tog mjerila – mjerena od najveće izmjere rukavca N_{max} – iznose:

odstupanje novog mjerila $-z \pm H/2$
gornje odstupanje istrošenog mjerila $+y$

Mjerilo »ne ide« (odmetak) – označujemo ga crvenom bojom – ne može ići preko rukavca. Odstupanje tog mjerila – mjerena od najmanje izmjere rukavca N_{min} – iznose: $\pm H/2$.

Vrijednosti H, z i y (µm) mjerila za rukavce

Nazivna izmjera mm	Oznaka	Stupanj temeljne tolerancije IT				
		6	7	8	9	11
1) ... 3	H	2	2	3	3	4
	z	1,5	1,5	2	5	10
	y	1,5	1,5	3	0	0
3) ... 6	H	2,5	2,5	4	4	5
	z	2	2	3	6	12
	y	1,5	1,5	3	0	0
6) ... 10	H	2,5	2,5	4	4	6
	z	2	2	3	7	14
	y	1,5	1,5	3	0	0
10) ... 18	H	3	3	5	5	8
	z	2,5	2,5	4	8	16
	y	2	2	4	0	0
18) ... 30	H	4	4	6	6	9
	z	3	3	5	9	19
	y	3	3	4	0	0
30) ... 50	H	4	4	7	7	11
	z	3,5	3,5	6	11	22
	y	3	3	5	0	0
50) ... 80	H	5	5	8	8	13
	z	4	4	7	13	25
	y	3	3	5	0	0
80) ... 120	H	6	6	10	10	15
	z	5	5	8	15	28
	y	4	4	6	0	0
120) ... 180	H	8	8	12	12	18
	z	6	6	9	18	32
	y	4	4	6	0	0

Tolerancije mjerila za provrte (HRN M.A1.310 – 1983)

N_{max} – najveća izmjera provrta
N_{min} – najmanja izmjera provrta
$T (= N_{max} - N_{min})$ – tolerancija izmjere provrta
H – tolerancija izradbe mjerila za provrt
z – položaj tolerancijskog polja za novo mjerilo »ide« iznad najmanje izmjere N_{min}
y – najveće odstupanje istrošenog mjerila »ide« ispod najmanje izmjere N_{min}

Mjerilo »ide« (dobro) mora pristajati u provrt. Odstupanja toga mjerila – mjerena od najmanje izmjere provrta N_{min} – iznose:

odstupanja novog mjerila $+z \pm H/2$
donje odstupanje istrošenog mjerila $-y$

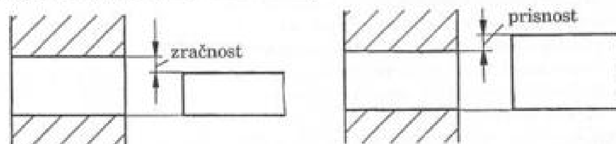
Mjerilo »ne ide« (odmetak) – označujemo ga crvenom bojom – ne smije pristajati u provrt. Odstupanja tog mjerila – mjerena od najveće izmjere provrta N_{max} – iznose: $\pm H/2$.

Vrijednost H, z i y (µm) mjerila za provrte

Nazivna izmjera mm	Oznaka	Stupanj temeljne tolerancije IT					
		6	7	8	9	10	11
1) ... 3	H	1,2	2	2	2	2	4
	z	1	1,5	2	5	5	10
	y	1	1,5	3	0	0	0
3) ... 6	H	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	5
	z	1,5	2	3	6	6	12
	y	1	1,5	3	0	0	0
6) ... 10	H	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	6
	z	1,5	2	3	7	7	14
	y	1	1,5	3	0	0	0
10) ... 18	H	2	3	3	3	3	8
	z	2	2,5	4	8	8	16
	y	1,5	2	4	0	0	0
18) ... 30	H	2,5	4	4	4	4	9
	z	2	3	5	9	9	19
	y	1,5	3	4	0	0	0
30) ... 50	H	2,5	4	4	4	4	11
	z	2,5	3,5	6	11	11	22
	y	2	3	5	0	0	0
50) ... 80	H	3	5	5	5	5	13
	z	2,5	4	7	13	13	25
	y	2	3	5	0	0	0
80) ... 120	H	4	6	6	6	6	15
	z	3	5	8	15	15	28
	y	3	4	6	0	0	0
120) ... 180	H	5	8	8	8	8	18
	z	4	6	9	18	18	32
	y	3	4	6	0	0	0

Dosjedi

Dosjed je skladnost, dobivena na temelju razlike izmjera dva spojno oblikovana elementa (provrta i rukavca). Dva dosjedu pripadajuća dosjedna dijela imaju jednaku nazivnu izmjeru.



Zračnost (zazor) je pozitivna razlika između izmjere provrta i izmjere rukavca prije spajanja, sastavljanja, ako je promjer rukavca manji od promjera provrta (gornja lijeva slika).

Prisnost je negativna razlika između izmjere provrta i izmjere rukavca prije spajanja, ako je promjer rukavca veći od promjera provrta (gornja desna slika).

Dosjedna tolerancija je aritmetička sredina tolerancija oba oblikovana elementa, a pripada (jednom) dosjedu. Dosjedna tolerancija je apsolutna vrijednost, bez predznaka.

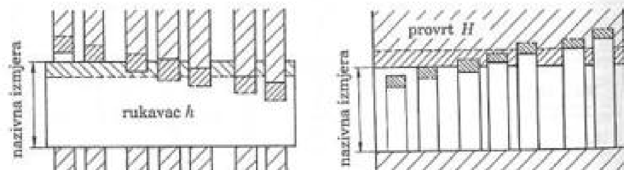
Dosjedni sustav je sustav dosjeda koji sadrži rukavce i provrte, pripadne sustavu graničnih izmjera.

Dosjedni sustav rukavca je dosjedni sustav u kojem se zahtjevana zračnost i prisnost postižu tako da provrte različitih tolerancijskih razreda sparujemo s rukavcem samo jednog tolerancijskog razreda.

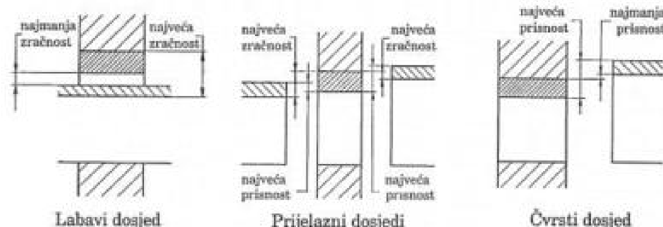
U dosjednom sustavu rukavca najveća izmjera rukavca jednaka je nazivnoj izmjeri, tj. gornje odstupanje izmjere rukavca ima vrijednost ništica (donja slika lijevo).

Dosjedni sustav provrta je dosjedni sustav u kojem se zahtjevana zračnost i prisnost postižu tako da rukavce različitih tolerancijskih razreda sparujemo s provrtom samo jednog tolerancijskog razreda.

U dosjednom je sustavu provrta najmanja izmjera provrta jednaka nazivnoj izmjeri, tj. donje odstupanje izmjere provrta ima vrijednost ništica (donja slika desno).



Vrste dosjeda



Labavi dosjed — Prijelazni dosjedi — Čvrsti dosjed

Prema preporuci ISO prednost imaju sljedeći dosjedi:

Prednostni dosjedi u sustavu jedinstvenog provrta

	1. prednost	2. prednost	3. prednost
H6		– j6, k6	– g5, h5, j5, k5, m5, n5, p5, r5
H7	– f6, h6, n6, r6	– g6, j6, k6, s6	– f6, m6, p6
H8	– f7, h9, u8, x8	– d9, e8	– c9, f8, h8
H9	– h9	– c11, h11	– d10, e9, f8, h8
H11	– h9	– a11, c11, d9, h11	– b11, d11
H12			– h12
H13			– h13

Prednostni dosjedi u sustavu jedinstvenog rukavca

	1. prednost	2. prednost	3. prednost
h5			– G6, H6, H6, K6, M6, N6, P6, R6
h6	– F8, H7	– G7	– F7, J7, K7, M7, N7, N7, P7, R7, S7
h8	– F8, H8		– B9, C9, D9, E8, F7, H9
h9	– C11, D10, E9, F8, H8	– H11	– H9
h11	– C11, D10	– A11, H11	– B11, D9, D11, H9
h12			– H12
h13			– H13

Neki dosjedi s 3. prednosti, koji se preporučuju samo za ograničena područja promjera, nisu ovdje navedeni.

Dosjedne tolerancije s 1. i 2. prednosti, predočene su na str. 562 ... 565.

Zračnost (max/min) u μm u sustavu jedinstvenog rukavca

Nazivna izmjera mm	A11 h11	C11 h11	D10 h11	C11 h9	D10 h9	E9 h9	F8 h9	F8 h8	F8 h6	G7 h6
1 ... 3	+390 +270	+180 +60	+120 +20	+145 +60	+85 +20	+64 +14	+45 +6	+34 +6	+26 +6	+18 +2
3) ... 6	+420 +270	+220 +70	+153 +30	+175 +70	+108 +30	+80 +20	+58 +10	+46 +10	+36 +10	+24 +4
6) ... 10	+460 +280	+260 +80	+188 +40	+206 +80	+134 +40	+97 +25	+71 +13	+57 +13	+44 +13	+29 +5
10) ... 18	+510 +290	+315 +95	+230 +50	+248 +95	+163 +50	+118 +32	+86 +16	+70 +16	+54 +16	+35 +6
18) ... 30	+560 +300	+370 +110	+279 +65	+292 +110	+201 +65	+144 +40	+105 +20	+86 +20	+66 +20	+41 +7
30) ... 40	+630 +310	+440 +120	+340 +80	+342 +120	+242 +80	+174 +50	+126 +25	+103 +25	+80 +25	+50 +9
40) ... 50	+640 +320	+450 +130		+352 +130						
50) ... 65	+720 +340	+520 +140	+410 +100	+404 +140	+294 +100	+208 +60	+150 +30	+122 +30	+95 +30	+59 +10
65 ... 80	+740 +360	+530 +150		+414 +150						
80) ... 100	+820 +380	+610 +170	+480 +120	+477 +170	+347 +120	+246 +72	+177 +36	+144 +36	+112 +36	+69 +12
100) ... 120	+850 +410	+620 +180		+487 +180						
120) ... 140	+960 +460	+700 +200	+55 +45	+550 +200	+405 +145	+285 +85	+206 +743	+169 +43	+131 +43	+79 +14
140) ... 160	+1020 +520	+710 +210		+560 +210						
160) ... 180	+1080 +580	+730 +230		+580 +230						
180) ... 200	+1240 +660	+820 +240	+645 +170	+645 +240	+470 +170	+330 +100	+237 +50	+194 +50	+151 +50	+90 +15
200) ... 225	+1320 +740	+840 +260		+665 +260						
225) ... 250	+1400 +820	+860 +280		+685 +280						
250) ... 280	+1560 +920	+940 +300	+720 +190	+750 +300	+530 +190	+370 +110	+267 +56	+218 +56	+169 +56	+101 +17
280) ... 315	+1690 +1050	+970 +330		+780 +330						
315) ... 355	+1920 +1200	+1080 +360	+800 +210	+860 +360	+580 +210	+405 +125	+291 +62	+240 +62	+187 +62	+111 +18
355) ... 400	+2070 +1350	+1120 +400		+900 +400						
400) ... 450	+2300 +1500	+1240 +440	+880 +230	+995 +440	+635 +230	+445 +135	+320 +68	+262 +68	+205 +68	+123 +20
450) ... 500	+2450 +1650	+1280 +480		+1035 +480						

Zračnost (max/min) u μm u sustavu jedinstvenog rukavca H/h

Nazivna izmjera mm	H11 h11	H9 h11	H11 h9	H9 h9	H8 h9	H8 h8	H7 h6
1 ... 3	+120 0	+85 0	+50 0	+39 0	+28 0	+28 0	+16 0
3) ... 6	+150 0	+105 0	+60 0	+48 0	+36 0	+36 0	+20 0
6) ... 10	+180 0	+126 0	+72 0	+58 0	+44 0	+44 0	+24 0
10) ... 14	+220 0	+153 0	+86 0	+70 0	+54 0	+54 0	+29 0
14) ... 18							
18) ... 24	+260 0	+182 0	+104 0	+85 0	+66 0	+66 0	+34 0
24) ... 30							
30) ... 40	+320 0	+222 0	+124 0	+101 0	+78 0	+78 0	+41 0
40) ... 50							
50) ... 65	+380 0	+264 0	+148 0	+120 0	+92 0	+92 0	+49 0
65) ... 80							
80) ... 100	+440 0	+307 0	+174 0	+141 0	+108 0	+108 0	+57 0
100) ... 120							
120) ... 140	+500 0	+350 0	+200 0	+163 0	+126 0	+126 0	+65 0
140) ... 160							
160) ... 180							
180) ... 200	+580 0	+405 0	+230 0	+187 0	+144 0	+144 0	+75 0
200) ... 225							
225) ... 250							
250) ... 280	+640 0	+450 0	+260 0	+211 0	+162 0	+162 0	+84 0
280) ... 315							
315) ... 355	+720 0	+500 0	+280 0	+229 0	+178 0	+178 0	+93 0
355) ... 400							
400) ... 450	+800 0	+555 0	+310 0	+252 0	+194 0	+194 0	+103 0
450) ... 500							

Zračnost (+) i prisnost (–) u μm u sastavu jedinstvenog provrta

Nazivna izmjera mm	H6 j6	H6 k6	H7 f7	H7 g6	H7 j6	H7 k6	H7 n6	H7 r6	H7 s6
1 ... 3	+8 / –4	+6 / –6	+26 / +6	+18 / +2	+12 / –4	+10 / –6	+6 / –10	0 / –16	–4 / –20
3) ... 6	+10 / –6	+7 / –9	+34 / +10	+24 / +4	+14 / –6	+11 / –9	+4 / –16	–3 / –23	–7 / –27
6) ... 10	+11 / –7	+8 / –10	+43 / +13	+29 / +5	+17 / –7	+14 / –10	+5 / –19	–4 / –28	–8 / –32
10) ... 18	+14 / –8	+10 / –12	+52 / +16	+35 / +6	+21 / –8	+17 / –15	+6 / –23	–5 / –34	–10 / –39
18) ... 30	+17 / –9	+11 / –15	+62 / +20	+41 / +7	+25 / –9	+23 / –18	+6 / –28	–7 / –41	–14 / –48
30) ... 40	+21 / –11	+14 / –18	+75 / +25	+50 / +9	–30 / –11	+28 / –21	+8 / –33	–9 / –50	–18 / –59
40) ... 50									
50) ... 65	+26 / –12	+17 / –21	+90 / +30	+59 / +10	+37 / –12	+32 / –25	+10 / –39	–11 / –60	–23 / –72
65) ... 80								–13 / –62	–29 / –78
80) ... 100	+31 / –13	+19 / –25	+106 / +36	+9 / +12	+44 / –13	+37 / –28	+12 / –45	–16 / –73	–36 / –93
100) ... 120								–19 / –76	–44 / –101
120) ... 140	+36 / –14	+22 / –28	+123 / +43	+79 / +14	+51 / –14	+42 / –33	+13 / –52	–23 / –88	–52 / –117
140) ... 160								–25 / –90	–60 / –125
160) ... 180								–28 / –93	–68 / –133
180) ... 200	–42 / –16	–25 / –33	+142 / +50	+90 / +15	+59 / –16	+48 / –36	+15 / –60	–31 / –106	–76 / –151
200) ... 225								–34 / –109	–84 / –159
225) ... 250								–38 / –113	–94 / –169
250) ... 280	+48 / –16	+28 / –36	+150 / +56	+101 / +17	+68 / –16	+53 / –40	+18 / –66	–42 / –126	–106 / –190
280) ... 315								–46 / –130	–118 / –202
315) ... 355	+54 / –18	–32 / –40	+176 / +62	+111 / +18	+75 / –18	+58 / –45	+20 / –73	–51 / –144	–133 / –226
355) ... 400								–57 / – 150	–151 / –244
400) ... 450	+60 / –20	–35 / –45	+194 / +68	+123 / +20	+83 / –20	+6 / –10	+23 / –80	–63 / –166	–169 / –272
450) ... 500								–69 / –172	–189 / –292

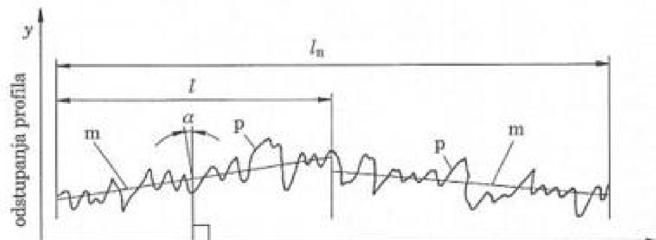
Zračnost(+) i prisnost (–) u μm u sustavu jedinstvenog provrta *(konac)*

Nazivna izmjera mm	H11 a11	H11 c11	H11 d9	H9 c11	H8 d9	H8 e8	H8 f7	H8 u8	H8 x8
1 ... 3	+390 / +270	+180 / +60	+105 / +20	+145 / +60	+59 / +20	+42 / +14	+30 / +6		–6 / –34
3) ... 6	+420 / +270	+220 / +70	+135 / +30	+175 / +70	+78 / +30	+56 / +20	+40 / +10		–10 / –46
6) ... 10	+460 / +270	+260 / +80	+166 / +40	+206 / +80	+98 / +40	+69 / +25	+50 / +13		–12 / –56
10) ... 14	+510 / +290	+315 / +95	+203 / +50	+248 / +95	+120 / +50	+86 / +32	+61 / +16		–13/–67
14) ... 18									–18/–72
18) ... 24	+560 / +300	+370 / +110	+247 / +65	+292 / +110	+150 / +65	+106 / +40	+74 / +20		–21/–87
24) ... 30								–15/–81	–31/–97
30) ... 40	+630 / +310	+440 / +120	+302 / +80	+342 / +120	+181 / +80	+128 / +50	+89 / +25	–21 / –99	–41 / –119
40) ... 50	+640 / +320	+450 / +130		+352 / +130				–31 / –109	–58 / –136
50) ... 65	+720 / +340	+520 / +140	+364 / +100	+404 / +140	+220 / +100	+152 / +60	+106 / +30	–41 / –133	–76 / –168
65) ... 80	+740 / +360	+530 / +150		+414 / +150				–56 / –148	–100 / –192
80) ... 100	+820 / +380	+610 / +170	+427 / +120	+177 / +170	+261 / +120	+180 / +72	+125 / +36	–70 / –178	–124 / –232
100) ... 120	+850 / +410	+620 / +180		+487 / +180				–90 / –198	–156 / –264
120) ... 140	+960 / +460	+700 / +200	+495 / +145	+550 / +200	+308 / +145	+211 / +85	+146 / +43	–107 / –133	–185 / –311
140) ... 160	+1020 / +520	+710 / +210		+560 / +210				–127 / –253	–217 / –343
160) ... 180	+1080 / +580	+730 / +230		+580 / +230				–147 / –273	–247 / –373
180) ... 200	+1240 / +660	+820 / +240	+575 / +170	+645 / +240	+357 / +170	+244 / +100	+168 / +50	–164 / –308	–278 / –422
200) ... 225	+1220 / +740	+840 / +260		+665 / +260				–186 / –330	–313 / –457
225) ... 250	+1400 / +820	+860 / +280		+685 / +280				–212 / –356	–353 / –497
250) ... 280	+1560 / +920	+940 / +300	+640 / +190	+750 / +300	+401 / +190	+272 / +110	+189 / +56	–234 / –396	–394 / –556
280) ... 315	+1690 / +1050	+970 / +330		+780 / +330				–269 / –431	–444 / –606
315) ... 355	+1920 / +1200	+1080 / +360	+710 / +210	+860 / +360	+439 / +210	+303 / +125	+208 / +62	–301 / –479	–501 / –679
355) ... 400	+2070 / +1350	+1120 / +400		+900 / +400				–346 / –524	
400) ... 450	+2300 / +1500	+1240 / +440	+785 / +230	+995 / +440	+482 / +230	+329 / +135	+228 / +68	–393 / –587	
450) ... 500	+2450 / +1650	+1280 / +480		+1035 / +480				–443 / –637	

POVRŠINSKA HRAPAVOST (ISO 4287/1 - 1984)

Površinska hrapavost je ukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta koje su više puta manje od površine predmeta, a uzrokovane su postupkom obradbe ili drugim utjecajima.

Profil p je presjek geometrijske površine s ravninom. Razlikujemo: uzdužni, poprečni, periodični i neperiodični profil.



Duljina vrjednovanja l_n je duljina na kojoj vrjednujemo vrijednosti veličina hrapavosti. Ta duljina može sadržavati jednu ili više *referentnih duljina l*. Referentne duljine biramo prema vrsti i finoći obradbe te mjernoj metodi:

Postupak obradbe	Prikladna referentna duljina l mm				
blanjanje			2,5	8	25
glodanje, bušenje		0,8	2,5	8	
tokarenje, razvrtavanje		0,8	2,5		
brušenje	0,25	0,8	2,5		
honanje, lepanje	0,25	0,8			

Sustav srednje crte

To je referentni sustav koji služi za vrjednovanje profila, ako se srednja *crta m* uzima kao referentna. Ona dijeli profil tako da je unutar referentne duljine l zbroj kvadrata svih odstupanja profila y od te crte najmanji.

Srednje aritmetičko odstupanje profila R_a je srednja aritmetička vrijednost apsolutnih vrijednosti profila y u granicama referentne duljine l.



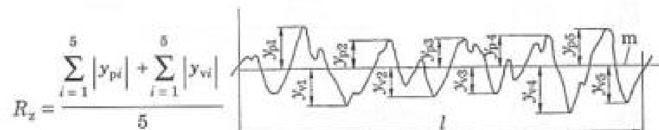
$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l |\, y(x) \,|\, dx$$

Srednje kvadratno odstupanje profila R_q je srednja kvadratna vrijednost profila u granicama referentne duljine l

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^l y^2(x)\, dx}\ .$$

Visina neravnina profila u deset točaka R_z je srednja vrijednost apsolutnih vrijednosti visine pet najviših izbočina i dubine pet najdubljih udubina u granicama referentne duljine

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^{5} |y_{pi}| + \sum_{i=1}^{5} |y_{vi}|}{5}$$

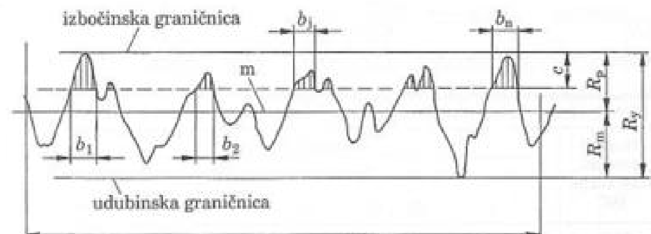


gdje je y_{pi} visina i-te najviše izbočine, a y_{vi} dubina i-te najdublje udubine.

Najveća visina profila R_y je udaljenost između dva pravca usporedna s srednjom crtom profila – izbočinskom graničnicom (pravac koji dotiče najviše točke profila) i udubinskom graničnicom (pravac koji dotiče najniže točke profila) – u granicama referentne duljine

$$R_y = R_p + R_m$$

gdje je R_p najveća visina izbočine profila i R_m najveća dubina udubine profila.



Visina razmaka c je udaljenost između presječnice razmaka i izbočinske graničnice; izražena je u ovisnosti od najveće visine profila R_y:

R_y	...1	1) ... 2,5	2,5) ... 4	4) ... 6	µm
c	0,1	0,25	0,6	1,6	µm

Relativna nosiva duljina profila t_p je omjer između nosive duljine profila $\eta_p = (b_1 + b_2 + ... + b_n)$ i referentne duljine l

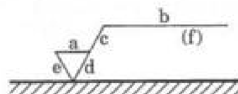
$$t_p = \frac{\eta_p}{l}\ .$$

Stupanj površinske hrapavosti (HRN M.A0.065 – 1981) **u ovisnosti o najvećem prosječnom aritmetičkom odstupanju profila R_a**

$R_{a\,max}$ / µm	Stupanj hrapavosti
0,025	N 1
0,05	N 2
0,1	N 3
0,2	N 4
0,4	N 5
0,8	N 6
1,6	N 7
3,2	N 8
6,3	N 9
12,5	N 10
25	N 11
50	N 12

Oznake površinske hrapavosti na crtežima (HRN M.A0.065 – 1981)

Oznake hrapavosti pri obradbi odvajanjem čestica:



a – srednje aritmetičko odstupanje profila R_a u µm ili oznaka razreda hrapavosti (N...)
b – postupak obradbe
c – referentna duljina l
d – smjer obradbe s obzirom na projekcijsku ravninu (usporedno: =, pravokutno: ⊥ , križno: ×, višesmjerno: M, približno kružno prema središtu: C, približno radijalno prema središtu: R)
e – dodatak za strojnu obradbu
f – drugi podatci o hrapavosti.

Oznaka hrapavosti bez obradbe odvajanjem čestica:

Primjeri:



Odnos tolerancijskog reda i razreda hrapavosti
(HRN M.A1.025 – 1981 i M.A0.065 – 1981)

Stupanj temeljne tolerancije ISO	Stupanj hrapavosti – Za nazivne mjere u mm: ... 3	3) ... 18	18) ... 80	80) ... 250	250) ...
IT 5	N 3	N 4	N 5	N 5	N 6
IT 6	N 4	N 5	N 5	N 6	N 6
IT 7	N 5	N 5	N 6	N 7	N 7
IT 8	N 5	N 6	N 7	N 7	N 8
IT 9	N 6	N 6	N 7	N 8	N 9
IT 10	N 7	N 7	N 8	N 9	N 9
IT 11	N 7	N 8	N 9	N 9	N 10
IT 12	N 8	N 8	N 9	N 10	N 11
IT 13	N 9	N 9	N 10	N 11	N 11
IT 14	N 10	N 10	N 11	N 11	N 12

Postupak obradbe u ovisnosti od stupnja hrapavosti

Postupak obradbe	$R_{a\,0,012}$ / µm	N 1	N 2	N 3	N 4	N 5	N 6	N 7	N 8	N 9	N 10	N 11	N 12	R_a / µm 100	200	400	800
Ručna obradba																	
– grubo turpijanje										•	•	•	•	•	•	•	
– fino turpijanje							•	•	•	•							
Lijevanje																	
– u pijesak													•	•	•	•	•
– u kokilu										•	•	•	•				
– u školjku								•	•	•	•	•					
Kovanje																	
– toplo, slobodno														•	•	•	•
– toplo u ukovnju										•	•	•	•	•			
– hladno u ukovnju								•	•	•							
Valjanje																	
– toplo										•	•	•	•	•			
– hladno					•	•	•	•	•	•							
Pjeskarenje											•	•	•	•			
Tokarenje																	
– grubo									•	•	•	•	•	•	•		
– fino					•	•	•	•	•								
Blanjanje																	
– grubo											•	•	•	•	•		
– fino								•	•	•	•						
Glodanje																	
– grubo									•	•	•	•	•				
– fino						•	•	•	•								
Bušenje svrdlom										•	•	•	•	•			
Razvrtavanje					•	•	•	•	•	•							
Brušenje																	
– grubo								•	•	•	•	•					
– fino				•	•	•	•	•									
Poliranje																	
– mehaničko				•	•	•	•										
– električno		•	•	•	•	•											
Honanje, lepanje		•	•	•	•	•	•	•									
»Superfiniš«	•	•	•	•													
Obradba navoja																	
– rezanje							•	•	•	•	•	•					
– brušenje					•	•	•	•									
Obradba zubaca																	
– blanjanje								•	•								
– glodanje							•	•	•								
– brušenje					•	•	•	•									

NAVOJI

Metrički navoji s trokutastim profilom ISO

Profil metričkih navoja ISO (HRN M.B0.010 – 1972)

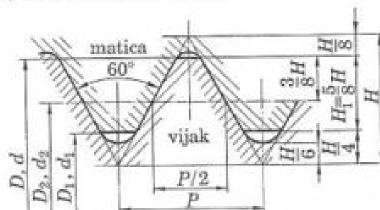
Korak navoja: P

Teorijska dubina navoja

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} P = 0{,}866\,025\,P$$

Nosiva dubina navoja

$$H_1 = \frac{5}{8} H = 0{,}541\,266\,P$$



d, d_1, d_2 – promjeri unutarnjeg navoja (vijka)

D, D_1, D_2 – promjeri vanjskog navoja (matice)

$d = D \qquad d_1 = D_1 = d - 2\,H_1 \qquad d_2 = D_2 = d - 3/4 \cdot H_2$

Izmjere u mm

P	*H*	(5/8) H	(3/8) *H*	*H*/4	*H*/6	*H*/8
0,2	0,173 2	0,108 3	0,065 0	0,043 3	0,028 9	0,021 7
0,25	0,216 5	0,135 3	0,081 2	0,054 1	0,036 1	0,027 1
0,3	0,259 8	0,162 4	0,097 4	0,065 0	0,043 3	0,032 5
0,35	0,303 1	0,189 4	0,113 7	0,075 8	0,050 5	0,037 9
0,4	0,346 4	0,216 5	0,129 9	0,086 6	0,057 7	0,043 3
0,45	0,389 7	0,243 6	0,146 1	0,097 4	0,065 0	0,048 7
0,5	0,433 0	0,270 6	0,162 4	0,108 3	0,072 2	0,054 1
0,6	0,519 6	0,324 8	0,194 9	0,129 9	0,086 6	0,065 0
0,7	0,606 2	0,378 9	0,227 3	0,151 6	0,101 0	0,075 8
0,75	0,649 5	0,406 0	0,243 6	0,162 4	0,108 3	0,081 2
0,8	0,692 8	0,433 0	0,259 8	0,173 2	0,115 5	0,086 6
1	0,866 0	0,541 3	0,324 8	0,216 5	0,144 3	0,108 3
1,25	1,082 5	0,676 6	0,405 9	0,270 6	0,180 4	0,135 3
1,5	1,299 0	0,811 9	0,487 1	0,324 8	0,216 5	0,162 4
1,75	1,515 5	0,947 2	0,568 3	0,378 9	0,252 6	0,189 4
2	1,732 1	1,082 5	0,649 5	0,433 0	0,288 7	0,216 5
2,5	2,165 1	1,353 2	0,811 9	0,541 3	0,360 8	0,270 6
3	2,598 1	1,623 8	0,974 3	0,649 5	0,433 0	0,324 8
3,5	3,031 1	1,894 4	1,136 7	0,757 8	0,505 2	0,378 9
4	3,464 1	2,165 1	1,299 0	0,866 0	0,577 4	0,433 0
4,5	3,897 1	2,435 7	1,461 4	0,974 3	0,649 5	0,487 1
5	4,330 1	2,706 3	1,623 8	1,082 5	0,721 7	0,541 3
5,5	4,763 1	2,977 0	1,786 2	1,190 8	0,793 9	0,595 4
6	5,196 2	3,247 6	1,948 6	1,299 0	0,866 0	0,649 5

Metrički normalni navoji (HRN M.B0.012 – 1972)

Oznaka [1]	$\frac{P}{\text{mm}}$	$\frac{d = D}{\text{mm}}$	$\frac{d_2 = D_2}{\text{mm}}$	$\frac{d_1 = D_1}{\text{mm}}$	$\frac{A}{\text{mm}^2}$
M 1	0,25	1	0,838	0,729	0,377
M 1,1	0,25	1,1	0,938	0,829	0,494
M 1,2	0,25	1,2	1,038	0,929	0,626
M 1,4	0,3	1,4	1,205	1,075	0,836
M 1,6	0,35	1,6	1,373	1,221	1,08
M 1,8	0,35	1,8	1,573	1,421	1,47
M 2	0,4	2	1,740	1,567	1,79
M 2,2	0,45	2,2	1,908	1,713	2,13
M 2,5	0,45	2,5	2,208	2,013	2,98
M 3	0,5	3	2,675	2,459	4,48
M 3,5	0,6	3,5	3,110	2,850	6,00
M 4	0,7	4	3,545	3,242	7,45
M 4,5	0,75	4,5	4,013	3,688	10,1
M 5	0,8	5	4,480	4,134	12,7
M 6	1	6	5,350	4,917	17,9
(M 7)	1	7	6,350	5,917	26,3
M 8	1,25	8	7,188	6,647	32,8
(M 9)	1,25	9	8,188	7,647	43,8
M 10	1,5	10	9,026	8,376	52,3
(M 11)	1,5	11	10,026	9,376	65,9
M 12	1,75	12	10,863	10,106	76,2
M 14	2	14	12,701	11,835	105
M 16	2	16	14,701	13,835	144
M 18	2,5	18	16,376	15,294	175
M 20	2,5	20	18,376	17,294	225
M 22	2,5	22	20,376	19,294	282
M 24	3	24	22,051	20,752	325
M 27	3	27	25,051	23,752	427
M 30	3,5	30	27,727	26,211	519
M 33	3,5	33	30,727	29,211	647
M 36	4	36	33,402	31,670	759
M 39	4	39	36,402	34,670	913
M 42	4,5	42	39,077	37,129	1 045
M 45	4,5	45	42,077	40,129	1 224
M 48	5	48	44,752	42,587	1 377
M 52	5	52	48,752	46,587	1 652
M 56	5,5	56	52,428	50,046	1 905
M 60	5,5	60	56,428	54,046	2 227
M 64	6	64	60,103	57,505	2 520
M 68	6	68	64,103	61,505	2 888

1) Deblje tiskane oznake su navoji koji u uporabi imaju prvu prednost, a obično tiskane oznake su navoji koji imaju drugu prednost. Navoji u zagradama imaju treću prednost i valja ih rabiti samo iznimno u prijeko potrebnim slučajevima.

Metrički fini (sitni) navoji (HRN M.B0.013 – 1972)

Oznaka [1] d (=D) × P mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm	Oznaka [1] d (=D) × P mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm
M 1 × 0,2	0,870	0,783	(M 15 × 1,5)	14,026	13,376
M 1,1 × 0,2	0,970	0,883	(M 15 × 1)	14,350	13,917
M 1,2 × 0,2	1,070	0,983	**M 16 × 1,5**	15,026	14,376
M 1,4 × 0,2	1,270	1,183	**M 16 × 1**	15,350	14,917
M 1,6 × 0,2	1,470	1,383	(M 17 × 1,5)	16,026	15,376
M 1,8 × 0,2	1,670	1,583	(M 17 × 1)	16,350	15,917
M 2 × 0,25	1,838	1,729	M 18 × 2	16,701	15,835
M 2,2 × 0,25	2,038	1,929	M 18 × 1,5	17,026	16,376
M 2,5 × 0,35	2,273	2,121	M 18 × 1	17,350	16,917
M 3 × 0,35	2,773	2,621	**M 20 × 2**	18,701	17,835
M 3,5 × 0,35	3,273	3,121	**M 20 × 1,5**	19,026	18,376
M 4 × 0,5	3,675	3,459	**M 20 × 1**	19,350	18,917
M 4,5 × 0,5	4,175	3,959	M 22 × 2	20,701	19,835
M 5 × 0,5	4,675	4,459	M 22 × 1,5	21,026	20,376
(M 5,5 × 0,5)	5,175	4,959	M 22 × 1	21,350	20,917
M 6 × 0,75	5,513	5,188	**M 24 × 2**	22,701	21,835
(M 7 × 0,75)	6,513	6,188	**M 24 × 1,5**	23,026	22,376
M 8 × 1	7,350	6,917	**M 24 × 1**	23,350	22,917
M 8 × 0,75	7,513	7,188	(M 25 × 2)	23,701	22,835
(M 9 × 1)	8,350	7,917	(M 25 × 1,5)	24,026	23,376
(M 9 × 0,75)	8,513	8,188	(M 25 × 1)	24,350	23,917
M 10 × 1,25	9,188	8,647	(M 26 × 1,5)	25,026	24,376
M 10 × 1	9,350	8,917	M 27 × 2	25,701	24,835
M 10 × 0,75	9,513	9,188	M 27 × 1,5	26,026	25,376
(M 11 × 1)	10,350	9,917	M 27 × 1	26,350	25,917
(M 11 × 0,75)	10,513	10,188	(M 28 × 2)	26,701	25,835
M 12 × 1,5	11,026	10,376	(M 28 × 1,5)	27,026	26,376
M 12 × 1,25	11,188	10,647	(M 28 × 1)	27,350	26,917
M 12 × 1	11,350	10,917	(M 30 × 3) [3]	28,051	26,752
M 14 × 1,5	13,026	12,376	**M 30 × 2**	28,701	27,835
(M 14 × 1,25) [2]	13,188	12,647	**M 30 × 1,5**	29,026	28,376
M 14 × 1	13,350	12,917	**M 30 × 1**	29,350	28,917
			(M 32 × 2)	30,701	29,835
			(M 32 × 1,5)	31,026	30,376
			(M 33 × 4) [3]	31,051	29,752
			M 33 × 2	31,701	30,835
			M 33 × 1,5	32,026	31,376

[1] Vidi napomenu na str. 571!

[2] Samo za svjećice motora s unutarnjim izgaranjem.

[3] Po mogućnosti ne rabiti!

Metrički fini (sitni) navoji (HRN M.B0.013 – 1972) (*nastavak*)

Oznaka [1] d (=D) × P mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm	Oznaka [1] d (=D) × P mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm
(M 35 × 1,5) [4]	34,026	33,376	(M 58 × 4)	55,402	53,670
M 36 × 3	34,051	32,752	(M 58 × 3)	56,051	54,752
M 36 × 2	34,701	33,835	(M 58 × 2)	56,701	55,835
M 36 × 1,5	35,026	34,376	(M 58 × 1,5)	57,026	56,376
(M 38 × 1,5)	37,026	36,376	M 60 × 4	57,402	55,670
M 39 × 3	37,051	35,752	M 60 × 3	58,051	56,752
M 39 × 2	37,701	36,835	M 60 × 2	58,701	57,835
M 39 × 1,5	38,026	37,376	M 60 × 1,5	59,026	58,376
(M 40 × 3)	38,051	36,752	(M 62 × 4)	59,402	57,670
(M 40 × 2)	38,701	37,835	(M 62 × 3)	60,051	58,752
(M 40 × 1,5)	39,026	38,376	(M 62 × 2)	60,701	59,835
			(M 62 × 1,5)	61,026	60,376
M 42 × 4	39,402	37,670	**M 64 × 4**	61,402	59,670
M 42 × 3	40,051	38,752	**M 64 × 3**	62,051	60,752
M 42 × 2	40,701	39,835	**M 64 × 2**	62,701	61,835
M 42 × 1,5	41,026	40,376	**M 64 × 1,5**	63,026	62,376
M 45 × 4	42,402	40,670	(M 65 × 4)	62,402	60,670
M 45 × 3	43,051	41,752	(M 65 × 3)	63,051	61,752
M 45 × 2	43,701	42,835	(M 65 × 2)	63,701	62,835
M 45 × 1,5	44,026	43,376	(M 65 × 1,5)	64,026	63,376
M 48 × 4	45,402	43,670	M 68 × 4	65,402	63,670
M 48 × 3	46,051	44,752	M 68 × 3	66,051	64,752
M 48 × 2	46,701	45,835	M 68 × 2	66,701	65,835
M 48 × 1,5	47,026	46,376	M 68 × 1,5	67,026	66,376
			(M 70 × 6)	66,103	63,505
(M 50 × 3)	48,051	46,752	(M 70 × 4)	67,402	65,670
(M 50 × 2)	48,701	47,835	(M 70 × 3)	68,051	66,752
(M 50 × 1,5)	49,026	48,376	(M 70 × 2)	68,701	67,835
			(M 70 × 1,5)	69,026	68,376
M 52 × 4	49,402	47,670	**M 72 × 6**	68,103	65,505
M 52 × 3	50,051	48,752	**M 72 × 4**	69,402	67,670
M 52 × 2	50,701	49,835	**M 72 × 3**	70,051	68,752
M 52 × 1,5	51,026	50,376	**M 72 × 2**	70,701	69,835
(M 55 × 4)	52,402	50,670	**M 72 × 1,5**	71,026	70,376
(M 55 × 3)	53,051	61,752	(M 75 × 4)	72,402	70,670
(M 55 × 2)	53,701	52,835	(M 75 × 3)	73,051	71,752
(M 55 × 1,5)	54,026	53,376	(M 75 × 2)	73,701	72,835
M 56 × 4	53,402	51,670	(M 75 × 1,5)	74,026	73,376
M 56 × 3	54,051	52,752			
M 56 × 2	54,701	53,835			
M 56 × 1,5	55,026	54,376			

[1] Vidi napomenu na str. 571!

[4] Samo za matice za učvršćivanje valjnih ležaja.

Metrički fini (sitni) navoji (HRN M.B0.013 – 1972) *(nastavak)*

Oznaka [1] $d\,(=D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm
M 76 × 6	72,103	69,505
M 76 × 4	73,402	71,670
M 76 × 3	74,051	72,752
M 76 × 2	74,701	73,835
M 76 × 1,5	75,026	74,376
(M 78 × 2)	76,701	75,835
M 80 × 6	76,103	73,505
M 80 × 4	77,402	75,670
M 80 × 3	78,051	76,752
M 80 × 2	78,701	77,835
M 80 × 1,5	79,026	78,376
(M 82 × 2)	80,701	79,835
M 85 × 6	81,103	78,505
M 85 × 4	82,402	80,670
M 85 × 3	83,051	81,752
M 85 × 2	83,701	82,835
M 90 × 6	86,103	83,505
M 90 × 4	87,402	85,670
M 90 × 3	88,051	86,752
M 90 × 2	88,701	87,835
M 95 × 6	91,103	88,505
M 95 × 4	92,402	90,670
M 95 × 3	93,051	91,752
M 95 × 2	93,701	92,835
M 100 × 6	96,103	93,505
M 100 × 4	97,402	95,670
M 100 × 3	98,051	96,752
M 100 × 2	98,701	97,835
M 105 × 6	101,103	98,505
M 105 × 4	102,402	100,670
M 105 × 3	103,051	101,752
M 105 × 2	103,701	102,835
M 110 × 6	106,103	103,505
M 110 × 4	107,402	105,670
M 110 × 3	108,051	106,752
M 110 × 2	108,701	107,835
M 115 × 6	111,103	108,505
M 115 × 4	112,402	110,670
M 115 × 3	113,051	111,752
M 115 × 2	113,701	112,835
M 120 × 6	116,103	113,505
M 120 × 4	117,402	115,670
M 120 × 3	118,051	116,752
M 120 × 2	118,701	117,835
M 125 × 6	121,103	118,505
M 125 × 4	122,402	120,670
M 125 × 3	123,051	121,752
M 125 × 2	123,701	122,835
M 130 × 6	126,103	123,505
M 130 × 4	127,402	125,670
M 130 × 3	128,051	126,752
M 130 × 2	128,701	127,835
(M 135 × 6)	131,103	128,505
(M 135 × 4)	132,402	130,670
(M 135 × 3)	133,051	131,752
(M 135 × 2)	133,701	132,835
M 140 × 6	136,103	133,505
M 140 × 4	137,402	135,670
M 140 × 3	138,051	136,752
M 140 × 2	138,701	137,835
(M 145 × 6)	141,103	138,505
(M 145 × 4)	142,402	140,670
(M 145 × 3)	143,051	141,752
(M 145 × 2)	143,701	142,835
M 150 × 6	146,103	143,505
M 150 × 4	147,402	145,670
M 150 × 3	148,051	146,752
M 150 × 2	148,701	147,835
(M 155 × 6)	151,103	148,505
(M 155 × 4)	152,402	150,670
(M 155 × 3)	153,051	151,752
M 160 × 6	156,103	153,505
M 160 × 4	157,402	155,670
M 160 × 3	158,051	156,752
(M 165 × 6)	161,103	158,505
(M 165 × 4)	162,402	160,670
(M 165 × 3)	163,051	161,752

[1] Vidi napomenu na str. 571!

Metrički fini (sitni) navoji (HRN M.B0.013 – 1972) *(konac)*

Oznaka [1] $d\,(=D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm
M 170 × 6	166,103	163,505
M 170 × 4	167,402	165,670
M 170 × 3	168,051	166,752
(M 175 × 6)	171,103	168,505
(M 175 × 4)	172,402	170,670
(M 175 × 3)	173,051	171,752
M 180 × 6	176,103	173,505
M 180 × 4	177,402	175,670
M 180 × 3	178,051	176,752
(M 185 × 6)	181,103	178,505
(M 185 × 4)	182,402	180,670
(M 185 × 3)	183,051	181,752
M 190 × 6	186,103	183,505
M 190 × 4	187,402	185,670
M 190 × 3	188,051	186,752
(M 195 × 6)	191,103	188,505
(M 195 × 4)	192,402	190,670
(M 195 × 3)	193,051	191,752
M 200 × 6	196,103	193,505
M 200 × 4	197,402	195,670
M 200 × 3	198,051	196,752
(M 205 × 6)	201,103	198,505
(M 205 × 4)	202,402	200,670
(M 205 × 3)	203,051	201,752
M 210 × 6	206,103	203,505
M 210 × 4	207,402	205,670
M 210 × 3	208,051	206,752
(M 215 × 6)	211,103	208,505
(M 215 × 4)	212,402	210,670
(M 215 × 3)	213,051	211,752
M 220 × 6	216,103	213,505
M 220 × 4	217,402	215,670
M 220 × 3	218,051	216,752
(M 225 × 6)	221,103	218,505
(M 225 × 4)	222,402	220,670
(M 225 × 3)	223,051	221,752
(M 230 × 6)	226,103	223,505
(M 230 × 4)	227,402	225,670
(M 230 × 3)	228,051	226,752
(M 235 × 6)	231,103	228,505
(M 235 × 4)	232,402	230,670
(M 235 × 3)	233,051	231,752
M 240 × 6	236,103	233,505
M 240 × 4	237,402	235,670
M 240 × 3	238,051	236,752
(M 245 × 6)	241,103	238,505
(M 245 × 4)	242,402	240,670
(M 245 × 3)	243,051	241,752
M 250 × 6	246,103	243,505
M 250 × 4	247,402	245,670
M 250 × 3	248,051	246,752
(M 255 × 6)	251,103	248,505
(M 255 × 4)	252,402	250,670
M 260 × 6	256,103	253,505
M 260 × 4	257,402	255,670
(M 265 × 6)	261,103	258,505
(M 265 × 4)	262,402	260,670
(M 270 × 6)	266,103	263,505
(M 270 × 4)	267,402	265,670
(M 275 × 6)	271,103	268,505
(M 275 × 4)	272,402	270,670
M 280 × 6	276,103	273,505
M 280 × 4	277,402	275,670
(M 285 × 6)	281,103	278,505
(M 285 × 4)	282,402	280,670
(M 290 × 6)	286,103	283,505
(M 290 × 4)	287,402	285,670
(M 295 × 6)	291,103	288,505
(M 295 × 4)	292,402	290,670
M 300 × 6	296,103	293,505
M 300 × 4	297,402	295,670

[1] Vidi napomenu na str. 571!

Tolerancije metričkih navoja (ISO)
(HRN M.B0.220 – 1967, 221 – 1974)

Navojni nazivni promjeri jesu promjeri profila navoja ISO (v. str. 552 ... 557). To su:

veliki nazivni promjeri	d, D
srednji nazivni promjeri	d_2, D_2
mali nazivni promjeri	d_1, D_1

Malim slovima označujemo vanjski navoj (vijak), a velikim unutarnji navoj (maticu).

Stvarni promjeri navoja su promjeri koje određujemo mjerenjem izrađenog navoja, a sadrže mjerne netočnosti.

Granični promjeri navoja su najveći i najmanji promjeri koje još dopuštamo.

Gornje odnosno *donje odstupanje* je razlika između najvećeg odnosno najmanjeg promjera i nazivnog promjera navoja.

– gornja odstupanja velikog, srednjeg i malog promjera navoja:
vijka a_{max} $a_{2\,max}$ $a_{1\,max}$ matice A_{max} $A_{2\,max}$ $A_{1\,max}$

– donja odstupanja velikog, srednjeg i malog promjera navoja:
vijka a_{min} $a_{2\,min}$ $a_{1\,min}$ matice A_{min} $A_{2\,min}$ $A_{1\,min}$.

Tolerancija promjera navoja je razlika između gornjeg i donjeg odstupanja (odn. između najvećeg i najmanjeg promjera).

Tolerancija je određena veličinom i položajem s obzirom na nazivni promjer.

Tolerancijske veličine su određene sa 7 stupnjeva, označene brojkama 3 do 9, od kojih rabimo:

za promjere	tolerancijska veličina
d	4, 6, 8
d_2, d_1	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
D_2, D_1	4, 5, 6, 7, 8

Tolerancije velikoga promjera navoja matice D nisu propisane.

Tolerancijski položaj s obzirom na nazivni promjer označujemo slovima. Određeno je pet položaja za navoje vijaka: e, g, h, k, p i dva položaja za navoje matica: G, H. Ti su tolerancijski položaji: e, g – ispod nazivnog promjera vijka, h – tik ispod nazivnog promjera vijka, k, p – iznad nazivnog promjera vijka, G – iznad nazivnog promjera matice, H – tik iznad nazivnog promjera matice.

Tolerancijska oznaka je spajanje oznaka za veličinu tolerancije i njezin položaj (npr. 6h).

Primjer tolerancijske oznake za:

– metrički vijčani navoj M20 s tolerancijom 6h: M20 – 6h

– isti navoj, ali s tolerancijom 4k za srednji promjer i 6h za veliki promjer: M20 – 4k 6h

– metrički navoj M20 s tolerancijom 6H: M20 – 6H.

Nosiva duljina l (tj. duljina dodira između matice i vijka u smjeru osi) određena je korakom P i srednjim nazivnim promjerom vijka d.

Normalna nosiva duljina l_N

d / mm	P / mm	l_N [1] / mm
0,99) ... 1,4	0,2	0,5) ... 1,4
	0,25	0,6) ... 1,7
	0,3	0,7) ... 2
1,4) ... 2,8	0,2	0,5) ... 1,5
	0,25	0,6) ... 1,9
	0,35	0,8) ... 2,6
	0,4	1) ... 3
	0,45	1,3) ... 3,8
2,8) ... 5,6	0,35	1) ... 3
	0,5	1,5) ... 4,5
	0,6	1,7) ... 5
	0,7	2) ... 6
	0,75	2,2) ... 6,7
	0,8	2,5) ... 7,5
5,6) ... 11,2	0,75	2,4) ... 7,1
	1	3) ... 9
	1,25	4) ... 12
	1,5	5) ... 15
11,2) ... 22,4	1	3,8) ... 11
	1,25	4,5) ... 13
	1,5	5,6) ... 16
	1,75	6) ... 18
	2	8) ... 24
	2,5	10) ... 30

d / mm	P / mm	l_N [1] / mm
22,4) ... 45	1	4) ... 12
	1,5	6,3) ... 19
	2	8,5) ... 25
	3	12) ... 36
	3,5	15) ... 45
	4	18) ... 53
	4,5	21) ... 63
45) ... 90	1,5	7,5) ... 22
	2	9,5) ... 28
	3	15) ... 45
	4	19) ... 56
	5	24) ... 71
	5,5	28) ... 85
	6	32) ... 95
90) ... 180	2	12) ... 36
	3	18) ... 53
	4	24) ... 71
	6	36) ... 106
180) ... 355	3	20) ... 60
	4	26) ... 80
	6	40) ... 118

Preporučene tolerancije (ovisno o kvaliteti tolerancije i nosivoj duljini l)

Kvaliteta izradbe navoja		Preporučene tolerancije za navoj vijka Nosiva duljina			za navoj matice Nosiva duljina		
		l_S	l_N	l_L	l_S	l_N	l_L
fina	– bez labavosti	3h 4h	4h	5b 4h	4H	5H	6H
	– mala prisnost	4k 6h [2]	4k 6h [2]	4k 6h [2]			
	– veća prisnost	3p 4h	3p 4h	3p 4h			
srednja	– velika labavost		6e	7e 6e			
	– mala labavost	5g 6g	6g	7g 6g	5G	6G	7G
	– bez labavosti	5h 6h	6h	7h 6h	5H	6H	7H
gruba	– mala labavost		8g	9g 8g		7G	8G
	– bez labavosti					7H	8H

Odstupanja (po HRN M.B0.230 – 1967 i M.B0.232 – 1974) za preporučene tolerancije uz nosivu duljinu l_N predočene su na str. 560 ... 566.

[1] Kratka nosiva duljina $l_s < l_{N\,min}$ duga nosiva duljina $l_L > l_{N\,max}$

[2] Također 3k 4h.

Tolerancije srednjega promjera navoja vijka d_2
Gornje i donje odstupanje $a_{2\,max}$ i $a_{2\,min}$ (µm)

Nazivni promjer $\frac{d}{mm}$	Korak $\frac{P}{mm}$	Tolerancije 6e	8g	6g	6h	4h	4k 6h	3p 4h
1,5) ... 2,8	0,2	–	–	-17 -67	0 -50	0 -32	–	–
	0,25	–	–	-18 -74	0 -56	0 -36	–	–
	0,35	–	–	-19 -82	0 -63	0 -40	–	–
	0,4	–	–	-19 -86	0 -67	0 -42	–	–
	0,45	–	–	-20 -91	0 -71	0 -45	–	–
2,8) ... 5,6	0,35	–	–	-19 -86	0 -67	0 -42	–	–
	0,5	-50 -125	–	-20 -95	0 -75	0 -48	+32 -16	+68 +30
	0,6	-53 -138	–	-21 -106	0 -85	0 -53	+39 -14	+73 +31
	0,7	-56 -146	–	-22 -112	0 -90	0 -56	+44 -12	+77 +32
	0,75	-56 -146	–	-22 -112	0 -90	0 -56	+44 -12	+77 +32
	0,8	-60 -155	-24 -174	-24 -119	0 -95	0 -60	+48 -12	+82 +34
5,6) ... 11,2	0,75	-56 -156	–	-22 -122	0 -100	0 -63	+51 -12	+82 +32
	1	-60 -172	-26 -206	-26 -138	0 -112	0 -71	+63 -8	+92 +36
	1,25	-63 -181	-28 -218	-28 -146	0 -118	0 -75	+70 -5	+98 +38
	1,5	-67 -199	-32 -244	-32 -164	0 -132	0 -85	+82 -3	+109 +42
11,2) ... 22,4	1	-60 -178	-26 -216	-26 -144	0 -118	0 -75	+75 0	+96 +36
	1,25	-63 -195	-28 -240	-28 -160	0 -132	0 -85	+85 0	+105 +38
	1,5	-67 -207	-32 -256	-32 -172	0 -140	0 -90	+90 0	+113 +42
	1,75	-71 -221	-34 -270	-34 -184	0 -150	0 - 95	+95 0	+119 +44
	2	-71 -231	-38 -288	-38 -198	0 -160	0 - 100	+100 0	+128 +48
	2,5	-80 -250	-42 -307	-42 -212	0 -170	0 -106	+106 0	+137 +52

Tolerancije srednjega promjera navoja vijka d_2 (*konac*)
Gornje i donje odstupanje $a_{2\,max}$ i $a_{2\,min}$ (µm)

Nazivni promjer $\frac{d}{mm}$	Korak $\frac{P}{mm}$	Tolerancije 6e	8g	6g	6h	4h	4k 6h	3p 4h
22,4) ... 45	1	-60 -185	-26 -226	-26 -151	0 -125	0 -80	+80 0	+99 +36
	1,5	-67 -217	-32 -268	-32 -182	0 -150	0 -95	+95 0	+117 +42
	2	-71 -241	-38 -303	-38 -208	0 -170	0 -106	+106 0	+133 +48
	3	-85 -285	-48 -363	-48 -248	0 -200	0 -125	+125 0	+158 +58
	3,5	-90 -302	-53 -388	-53 -265	0 -212	0 -132	+132 0	+169 +63
	4	-95 -319	-60 -415	-60 -284	0 -224	0 -140	+140 0	+182 +70
	4,5	-100 -336	-63 -438	-63 -299	0 -236	0 -150	+150 0	+191 +73
45) ... 90	1,5	-67 -227	-32 -282	-32 -192	0 -160	0 -100	+100 0	+122 +42
	2	-71 -251	-38 -318	-38 -218	0 -180	0 -112	+112 0	+138 +48
	3	-85 -297	-48 -383	-48 -260	0 -212	0 -132	+132 0	+164 +58
	4	-95 -331	-60 -435	-60 -296	0 -236	0 -150	+150 0	+188 +70
	5	-106 -356	-71 -471	-71 -321	0 -250	0 -160	+160 0	+206 +81
	5,5	-112 -377	-75 -500	-75 -340	0 -265	0 -170	–	–
	6	-118 -398	-80 -530	-80 -360	0 -280	0 -180	–	–
90) ... 180	2	-71 -261	-38 -338	-38 -228	0 -190	0 -118	+118 0	+143 +48
	3	-85 -309	-48 -403	-48 -272	0 -224	0 -140	+140 0	+170 +58
	4	-95 -345	-60 -460	-60 -310	0 -250	0 -160	+160 0	+195 +70
	6	-118 -418	-80 -555	-80 -380	0 -300	0 -190	–	–
180) ... 355	3	-85 -335	-48 -448	-48 -298	0 - 250	0 -160	+160 0	+183 +58
	4	-95 -375	-60 -510	-60 -340	0 -280	0 -180	+180 0	+210 +70
	6	-118 -433	-80 -580	-80 -395	0 -315	0 -200	–	–

Tolerancije srednjega promjera navoja matice D_2
Gornje odstupanje $A_{2\,max}$ (µm) (Donje odstupanje $A_{2\,min}$ za sve tolerancije H je 0)

Nazivni promjer $D = d$ / mm	Korak P / mm	Tolerancije 7G		6G		7H	6H	5H
1,5) ... 2,8	0,2	–		–		–	–	–
	0,25	–		–		–	–	+60
	0,35	–		+104	+19	–	+85	+67
	0,4	–		+109	+19	–	+90	+71
	0,45	–		+115	+20	–	+95	+75
2,8) ... 5,6	0,35	–		+109	+19	–	+90	+71
	0,5	+145	+20	+120	+20	+125	+100	+80
	0,6	+161	+21	+133	+21	+140	+112	+90
	0,7	+172	+22	+140	+22	+150	+118	+95
	0,75	+172	+22	+140	+22	+150	+118	+95
	0,8	+184	+24	+149	+24	+160	+125	+100
5,6) ... 11,2	0,75	+192	+22	+154	+22	+170	+132	+106
	1	+216	+26	+176	+26	+190	+150	+118
	1,25	+228	+28	+188	+28	+200	+160	+125
	1,5	+256	+32	+212	+32	+224	+180	+140
11,2) ... 22,4	1	+226	+26	+186	+26	+200	+160	+125
	1,25	+252	+28	+208	+28	+224	+180	+140
	1,5	+268	+32	+222	+32	+236	+190	+150
	1,75	+284	+34	+234	+34	+250	+200	+160
	2	+303	+38	+250	+38	+265	+212	+170
	2,5	+322	+42	+266	+42	+280	+224	+180
22,4) ... 45	1	+238	+26	+196	+26	+212	+170	+132
	1,5	+282	+32	+232	+32	+250	+200	+160
	2	+318	+38	+262	+38	+280	+224	+180
	3	+383	+48	+313	+48	+335	+265	+212
	3,5	+408	+53	+333	+53	+355	+280	+224
	4	+435	+60	+360	+60	+375	+300	+236
	4,5	+463	+63	+378	+63	+400	+315	+250
45) ... 90	1,5	+297	+32	+244	+32	+265	+212	+170
	2	+338	+38	+274	+38	+300	+236	+190
	3	+403	+48	+328	+48	+355	+280	+224
	4	+460	+60	+375	+60	+400	+315	+250
	5	+496	+71	+406	+71	+425	+335	+265
	5,5	+525	+75	+430	+75	+450	+355	+280
	6	+555	+80	+455	+80	+475	+375	+300
90) ... 180	2	+353	+38	+288	+38	+315	+250	+200
	3	+423	+48	+348	+48	+375	+300	+236
	4	+485	+60	+395	+60	+425	+335	+265
	6	+580	+80	+480	+80	+500	+400	+315
180) ... 355	3	+473	+48	+383	+48	+425	+335	+265
	4	+535	+60	+435	+60	+475	+375	+300
	6	+610	+80	+505	+80	+530	+425	+335

Tolerancije velikog promjera navoja vijka d
Gornje i donje odstupanje a_{max} i a_{min} (µm)

Korak P / mm	Tolerancije 6e	8g	6g	6h	4h	4k 6h	3p 4h
0,2	–	–	–17 –73	0 –56	0 –36	0 –56	–
0,25	–	–	–18 –85	0 –67	0 –42	0 –67	–
0,35	–	–	–19 –104	0 –85	0 –53	0 –85	0 –53
0,4	–	–	–19 –114	0 –95	0 –60	0 –95	0 –60
0,45	–	–	–20 –120	0 –100	0 –63	0 –100	0 –63
0,5	–50 –156	–	–20 –126	0 –106	0 –67	0 –106	0 –67
0,6	–53 –178	–	–21 –146	0 –125	0 –80	0 –125	0 –80
0,7	–56 –196	–	–22 –162	0 –140	0 –90	0 –140	0 –90
0,75	–56 –196	–	–22 –162	0 –140	0 –90	0 –140	0 –90
0,8	–60 –210	–24 –260	–24 –174	0 –150	0 –95	0 –150	0 –95
1	–60 –240	–26 –306	–26 –206	0 –180	0 –112	0 –180	0 –112
1,25	–63 –275	–28 –363	–28 –240	0 –212	0 –132	0 –212	0 –132
1,5	–67 –303	–32 –407	–32 –268	0 –236	0 –150	0 –236	0 –150
1,75	–71 –336	–34 –459	–34 –299	0 –265	0 –170	0 –265	0 –170
2	–71 –351	–38 –488	–38 –318	0 –280	0 –180	0 –280	0 –180
2,5	–80 –415	–42 –572	–42 –377	0 –335	0 –212	0 –335	0 –212
3	–85 –460	–48 –648	–48 –423	0 –375	0 –236	0 –375	0 –236
3,5	–90 –515	–53 –723	–53 –478	0 –425	0 –265	0 –425	0 –265
4	–95 –570	–60 –810	–60 –535	0 –475	0 –300	0 –475	0 –300
4,5	–100 –600	–63 –863	–63 –563	0 –500	0 –315	0 –500	0 –315
5	–106 –636	–71 –921	–71 –601	0 –530	0 –335	0 –530	0 –335
5,5	–112 –672	–75 –975	–75 –635	0 –560	0 –355	0 –560	0 –355
6	–118 –718	–80 –1 030	–80 –680	0 –600	0 –375	0 –600	0 –375

Tolerancije malog promjera navoja vijka d_1

Gornje i donje odstupanje $a_{1\,max}$ i $a_{1\,min}$ (µm)

Nazivni promjer d / mm	Korak P / mm	Tolerancije 6e	8g	6g	6h	4h	4k 6h	3p 4h
1,5) ... 2,8	0,2	–	–	-46 -110	-29 -93	-29 -75	–	–
	0,25	–	–	-54 -128	-36 -110	-36 -90	–	–
	0,35	–	–	-70 -158	-51 -139	-51 -116	–	–
	0,4	–	–	-77 -173	-58 -154	-58 -129	–	–
	0,45	–	–	-85 -188	-65 -168	-65 -142	–	–
2,8) ... 5,6	0,35	–	–	-70 -162	-51 -143	-51 -118	–	–
	0,5	-122 -233	–	-92 -203	-72 -183	-72 -156	-124 -208	-78 -152
	0,6	-140 -268	–	-108 -236	-87 -215	-87 -183	-144 -240	-99 -184
	0,7	-157 -297	–	-123 -263	-101 -241	-101 -207	-163 -269	-119 -214
	0,75	-164 -308	–	-130 -274	-108 -252	-108 -218	-174 -284	-130 -229
	0,8	-176 -329	-140 -348	-140 -293	-116 -269	-116 -234	-185 -303	-139 -245
5,6) ... 11,2	0,75	-164 -318	–	-130 -284	-108 -262	-108 -225	-174 -291	-130 -234
	1	-204 -388	-170 -422	-170 -354	-144 -328	-144 -287	-224 -367	-180 -308
	1,25	-243 -451	-208 -488	-208 -416	-180 -388	-180 -345	-275 -440	-232 -382
	1,5	-284 -524	-249 -569	-249 -489	-217 -457	-217 -410	-327 -520	-282 -457
11,2) ... 22,4	1	-204 -394	-170 -432	-170 -360	-144 -334	-144 -291	-224 -371	-180 -312
	1,25	-243 -465	-208 -510	-208 -430	-180 -402	-180 -355	-275 -450	-232 -389
	1,5	-284 -532	-249 -581	-249 -497	-217 -465	-217 -415	-327 -525	-282 -461
	1,75	-324 -600	-287 -649	-287 -563	-253 -529	-253 -474	-378 -599	-334 -535
	2	-360 -664	-327 -721	-327 -631	-289 -593	-289 -533	-432 -676	-384 -608
	2,5	-441 -791	-403 -848	-403 -753	-361 -711	-361 -647	-540 -826	-488 -753

Tolerancije malog promjera navoja vijka d_1 *(konac)*

Gornje i donje odstupanje $a_{1\,max}$ i $a_{1\,min}$ (µm)

Nazivni promjer d / mm	Korak P / mm	Tolerancije 6e	8g	6g	6h	4h	4k 6h	3p 4h
22,4) ... 45	1	-204 -401	-170 -442	-170 -367	-144 -341	-144 -296	-224 -376	-180 -315
	1,5	-284 -542	-249 -593	-249 -507	-217 -475	-217 -420	-327 -530	-282 -465
	2	-360 -674	-327 -736	-327 -641	-289 -603	-289 -539	-432 -682	-384 -613
	3	-518 -934	-481 -1 012	-481 -897	-433 -849	-433 -774	-648 -989	-590 -906
	3,5	-595 -1 059	-558 -1 145	-558 -1 022	-505 -969	-505 -889	-756 -1 140	-693 -1 051
	4	-672 -1 184	-637 -1 280	-637 -1 149	-577 -1 089	-577 -1 005	-864 -1 292	-794 -1 194
	4,5	-750 -1 310	-713 -1 412	-713 -1 273	-650 -1 210	-650 -1 124	-972 -1 446	-899 -1 341
45) ... 90	1,5	-284 -552	-249 -607	-249 -517	-217 -485	-217 -425	-327 -535	-282 -470
	2	-360 -684	-327 -751	-327 -651	-289 -613	-289 -545	-432 -688	-384 -618
	3	-518 -946	-481 -1 032	-481 -909	-433 -861	-433 -781	-648 -996	-590 -912
	4	-672 -1 196	-637 -1 300	-637 -1 161	-577 -1 101	-577 -1 015	-864 -1 302	-794 -1 200
	5	-828 -1 438	-793 -1 553	-793 -1 403	-722 -1 332	-722 -1 242	-1 080 -1 600	-999 -1 484
	5,5	-906 -1 567	-869 -1 690	-869 -1 530	-794 -1 455	-794 -1 360	–	–
	6	-984 -1 696	-946 -1828	-946 -1 658	-866 -1 578	-866 -1 478	–	–
90) ... 180	2	-360 -694	-327 -771	-327 -661	-289 -623	-289 -551	-432 -694	-384 -623
	3	-518 -958	-481 -1 052	-481 -921	-433 -873	-433 -789	-648 -1 004	-590 -918
	4	-672 -1 210	-637 -1 325	-637 -1 175	-577 -1 115	-577 -1 025	-864 -1 312	-794 -1 207
	6	-984 -1 716	-946 -1 853	-946 -1 678	-866 -1 598	-866 -1 488	–	–
180) ... 355	3	-518 -984	-481 -1 097	-481 -947	-433 -899	-433 -809	-648 -1 024	-590 -931
	4	-672 -1 240	-637 -1 375	-637 -1 205	-577 -1 145	-577 -1 045	-864 -1 332	-794 -1 222
	6	-984 -1 731	-946 -1 878	-946 -1 693	-866 -1 613	-866 -1 498	–	–

Tolerancije malog promjera navoja matice D_1

Gornje odstupanje $A_{1\,max}$ (µm) (Donje odstupanje $A_{1\,min}$ za sve tolerancije H je 0)

Korak P/mm	Tolerancije 7G		6G		7H	6H	5H
0,2	–		–		–	–	–
0,25	–		–		–	–	+56
0,35	–		+119	+19	–	+100	+80
0,4	–		+131	+19	–	+112	+90
0,45	–		+145	+20	–	+125	+100
0,5	+200	+20	+160	+20	+180	+140	+112
0,6	+221	+21	+181	+21	+200	+160	+125
0,7	+246	+22	+202	+22	+224	+180	+140
0,75	+258	+22	+212	+22	+236	+190	+150
0,8	+274	+24	+224	+24	+250	+200	+160
1	+326	+26	+262	+26	+300	+236	+190
1,25	+363	+28	+293	+28	+335	+265	+212
1,5	+407	+32	+332	+32	+375	+300	+236
1,75	+459	+34	+369	+34	+425	+335	+265
2	+513	+38	+413	+38	+475	+375	+300
2,5	+602	+42	+492	+42	+560	+450	+355
3	+678	+48	+548	+48	+630	+500	+400
3,5	+763	+53	+613	+53	+710	+560	+450
4	+810	+60	+660	+60	+750	+600	+475
4,5	+913	+63	+733	+63	+850	+670	+530
5	+971	+71	+781	+71	+900	+710	+560
5,5	+1 025	+75	+825	+75	+950	+750	+600
6	+1 080	+80	+880	+80	+1 000	+800	+630

Navojni dosjedi

Pod *navojnim dosjedom* razumijevamo međusobnu podudarnost vijka i matice.

Zračnost (zazor) navojnog dosjeda je razlika između većeg promjera matice i manjeg promjera vijka.

Prisnost (preklop) navojnog dosjeda je razlika između manjeg promjera matice i većeg promjera vijka.

Tolerancija navojnog dosjeda je razlika između najveće i najmanje zračnosti (odnosno prisnosti) navojnog dosjeda.

Vrste navojnih dosjeda

Labavi navojni dosjedi: H/e, H/g.

Npr. vijci i matice za opću uporabu

– gruba kvaliteta 7H/8g – srednja kvaliteta **6H/6e, 6H/6g**

– fina kvaliteta 5H/4h.

Prijelazni navojni dosjedi: H/h.

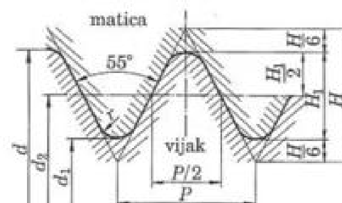
Čvrsti navojni dosjedi: H/k, H/p.

Npr. za čvrsto (s prisnošću) pritegnute vijke i matice

– čvrsto pritezanje 6H/4k 6h – vrlo čvrsto pritezanje 5H/3p 4h.

Cijevni navoji (HRN M.B0.056 – 1952)

Profil cijevnih navoja (Whitworthov)



Broj navoja na 25,4 mm n

Korak navoja (mm)

$$P = 25{,}4/n$$

Teorijska dubina navoja

$$H = 0{,}96049\,P$$

Nosiva dubina navoja

$$H_1 = 0{,}640\,33\,P$$

Zaobljenost

$$r = 0{,}137\,33\,P$$

Veliki promjer navoja

$$d$$

Mali promjer navoja

$$d_1 = d - 2\,H_1$$

Srednji promjer navoja

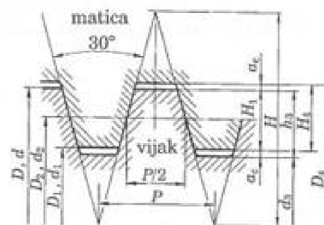
$$d_2 = d - H_1$$

Oznaka [1]	d/mm	n	P/mm
G 1/8	9,728	28	0,907
G 1/4	13,157	19	1,337
G 3/8	16,662	19	1,337
G 1/2	20,955	14	1,814
G 5/8	22,911	14	1,814
G 3/4	26,441	14	1,814
G 7/8	30,201	14	1,814
G 1	33,249	11	2,309
(G 1 1/8)	37,897	11	2,309
G 1 1/4	41,910	11	2,309
(G 1 3/8)	44,323	11	2,309
G 1 1/2	47,803	11	2,309
G 1 3/4	53,746	11	2,309
G 2	59,614	11	2,309
G 2 1/4	65,710	11	2,309
G 2 1/2	75,184	11	2,309
G 2 3/4	81,534	11	2,309
G 3	87,884	11	2,309
G 3 1/4	93,980	11	2,309
G 3 1/2	100,330	11	2,309
G 3 3/4	106,680	11	2,309
G 4	113,030	11	2,309
G 4 1/2	125,730	11	2,309
G 5	138,430	11	2,309
G 5 1/2	151,130	11	2,309
G 6	163,830	11	2,309
G 7	189,230	10	2,540
G 8	214,630	10	2,540
G 9	240,030	10	2,540
G 10	265,430	10	2,540
G 11	290,830	8	3,175
G 12	316,230	8	3,175
G 13	347,472	8	3,175
G 14	372,872	8	3,175
G 15	398,272	8	3,175
G 16	423,672	8	3,175
G 17	449,072	8	3,175
G 18	474,472	8	3,175

[1] Oznaka (nazivni promjer) daje približan unutarnji promjer cijevi u (napuštenim) colima. – Treba se po mogućnosti kloniti izmjera u zagradama.
Ranije se umjesto slova G rabilo slovo R, npr. G 1/8 = R 1/8.
1 col = 1 in = 25,4 mm

Trapezni navoji (HRN M.B0.060 – 1977)

Profil trapeznih navoja



Korak navoja P

Dubina temeljnog profila navoja (= nosiva dubina)

$$H_1 = 0{,}5\,P$$

Nazivna dubina navoja

- vijka $\quad h_3 = H_1 + a_c$
- matice $\quad H_4 = H_1 + a_c$

Zračnost $\quad a_c$

Zaobljenost

- na tjemenu R_1
- u korijenu R_2

Veliki promjer navoja

- vijka $\quad d \quad (= D)$
- matice $\quad D_4 = d + 2a_c$

Mali promjer navoja

- vijka $\quad d_3 = d - 2h_3$
- matice

$$D_1 = d - 2H_1 \quad (= d_1)$$

Srednji promjer navoja

$$d_2 = D_2 = d - H_1$$

Presjek jezgre

$$A = d_3^2\,\pi/4$$

$\frac{P}{\text{mm}}$	$\frac{H_1}{\text{mm}}$	$\frac{a_c}{\text{mm}}$	$\frac{h_3 = H_4}{\text{mm}}$	$\frac{R_{1\,max}}{\text{mm}}$	$\frac{R_{2\,max}}{\text{mm}}$
1,5	0,75	0,15	0,9	0,075	0,15
2	1	0,25	1,25	0,125	0,25
3	1,5	0,25	1,75	0,125	0,25
4	2	0,25	2,25	0,125	0,25
5	2,5	0,25	2,75	0,125	0,25
6	3	0,5	3,5	0,25	0,5
7	3,5	0,5	4	0,25	0,5
8	4	0,5	4,5	0,25	0,5
9	4,5	0,5	5	0,25	0,5
10	5	0,5	5,5	0,25	0,5
12	6	0,5	6,5	0,25	0,5
14	7	1	8	0,5	1
16	8	1	9	0,5	1
18	9	1	10	0,5	1
20	10	1	11	0,5	1
22	11	1	12	0,5	1
24	12	1	13	0,5	1
28	14	1	15	0,5	1
32	16	1	17	0,5	1
36	18	1	19	0,5	1
40	20	1	21	0,5	1
44	22	1	23	0,5	1

Viševojni trapezni navoji

Korak navoja P n-vojnih navoja veći je n-puta od koraka jednovojnog navoja, dok sve druge izmjere ostaju nepromijenjene.

Trapezne navoje rabimo posebno za radna vretena.
Izmjere normiranih trapeznih navoja predočene su na str. 587 i 588.

Trapezni navoji (HRN M.B0.061/062 – 1977)

Oznaka [1]	$\frac{P}{\text{mm}}$	$\frac{d}{\text{mm}}$	$\frac{d_2 = D_2}{\text{mm}}$	$\frac{d_3}{\text{mm}}$	$\frac{D_1}{\text{mm}}$	$\frac{D_4}{\text{mm}}$	$\frac{A}{\text{mm}^2}$
Tr 8 × **1,5**	1,5	8	7,25	6,2	6,5	8,3	30,2
Tr 9 × 2	2	9	8	6,5	7	9,5	33,2
Tr 10 × **1,5**	1,5	10	9,25	8,2	8,5	10,3	52,8
Tr 10 × 2	2	10	9	7,5	8	10,5	44,2
Tr 11 × 2	2	11	10	8,5	9	11,5	56,7
Tr 12 × **2**	2	12	11	9,5	10	12,5	70,9
Tr 12 × 3	3	12	10,5	8,5	9	12,5	56,7
Tr 14 × 3	3	14	12,5	10,5	11	14,5	86,6
Tr 16 × **2**	2	16	15	13,5	14	16,5	143
Tr 16 × 4	4	16	14	11,5	12	16,5	104
Tr 18 × 4	4	18	16	13,5	14	18,5	143
Tr 20 × **2**	2	20	19	17,5	18	20,5	241
Tr 20 × 4	4	20	18	15,5	16	20,5	189
Tr 22 × 5	5	22	19,5	16,5	17	22,5	214
Tr 24 × **3**	3	24	22,5	20,5	21	24,5	330
Tr 24 × 5	5	24	21,5	28,5	19	24,5	269
Tr 24 × 8	8	24	20	15	16	25	177
Tr 26 × 5	5	26	23,5	20,5	21	26,5	330
Tr 28 × **3**	3	28	26,5	24,5	25	28,5	471
Tr 28 × 5	5	28	25,5	22,5	23	28,5	398
Tr 28 × 8	8	28	24	19	20	29	284
Tr 30 × 6	6	30	27	23	24	31	415
Tr 32 × **3**	3	32	30,5	28,5	29	32,5	638
Tr 32 × 6	6	32	29	25	26	33	491
Tr 32 × 10	10	32	27	21	22	33	346
Tr 34 × 6	6	34	31	27	28	35	573
Tr 36 × **3**	3	36	34,5	32,5	33	36,5	830
Tr 36 × 6	6	36	33	29	30	37	661
Tr 36 × 10	10	36	31	25	26	37	491
Tr 38 × 7	7	38	34,5	30	31	39	707
Tr 40 × **3**	3	40	38	36,5	37	40,5	1 046
Tr 40 × 7	7	40	36,5	32	33	41	804
Tr 40 × 10	10	40	35	29	30	41	661
Tr 42 × 7	7	42	38,5	34	35	43	908
Tr 44 × **3**	3	44	42,5	40,5	41	44,5	1 288
Tr 44 × 7	7	44	40,5	36	37	45	1 018
Tr 44 × 10	10	44	38	31	32	45	755
Tr 46 × 8	8	46	42	37	38	47	1 075

[1] Uzeti su u obzir svi navoji prve prednosti (debelo tiskani), od navoja druge prednosti samo oni s prednosti (debelo tiskani), od navoja druge prednosti samo oni s prednosnim korakom.

Trapezni navoji (HRN M.B0.061/062 – 1977) (*nastavak*)

Oznaka [1]	P mm	d mm	$d_2 = D_2$ mm	d_3 mm	D_1 mm	D_4 mm	A mm²
Tr 48 × 3	3	48	46,5	44,5	45	48,5	1 555
Tr 48 × 8	8	48	44	39	40	49	1 195
Tr 48 × 12	12	48	42	35	36	49	962
Tr 50 × 8	8	50	46	41	42	51	1 320
Tr 52 × 3	3	52	50,5	48,5	49	52,5	1 847
Tr 52 × 8	8	52	48	43	44	53	1 452
Tr 52 × 12	12	52	46	39	40	53	1 195
Tr 55 × 9	9	55	50,5	45	46	56	1 590
Tr 60 × 3	3	60	58,5	56,5	57	60,5	2 507
Tr 60 × 9	9	60	55,5	50	51	61	1 963
Tr 60 × 14	14	60	53	44	46	62	1 521
Tr 65 × 10	10	65	60	54	55	66	2 290
Tr 70 × 4	4	70	68	65,5	66	70,5	3 370
Tr 70 × 10	10	70	65	59	60	71	2 734
Tr 70 × 16	16	70	62	52	54	72	2 124
Tr 75 × 10	10	75	70	64	65	76	3 217
Tr 80 × 4	4	80	78	75,5	76	80,5	4 477
Tr 80 × 10	10	80	75	69	70	81	3 739
Tr 80 × 16	16	80	72	62	64	82	3 019
Tr 85 × 12	12	85	79	72	73	86	4 072
Tr 90 × 4	4	90	88	85,5	86	90,5	5 741
Tr 90 × 12	12	90	84	77	78	91	4 657
Tr 90 × 18	18	90	81	70	72	92	3 848
Tr 95 × 12	12	95	89	82	83	96	5 281
Tr 100 × 4	4	100	98	95,5	96	100,5	7 163
Tr 100 × 12	12	100	94	87	88	101	5 945
Tr 100 × 20	20	100	90	78	80	102	4 778
(Tr 105 × 12)	12	105	99	92	93	106	6 648
Tr 110 × 12	12	110	104	97	98	111	7 390
(Tr 115 × 14)	14	115	108	99	101	117	7 698
TR120 × 6	6	120	117	113	114	121	10 029
Tr 120 × 14	14	120	113	104	106	122	8 495
Tr 120 × 22	22	120	109	96	98	122	7 238
(Tr 125 × 14)	14	125	118	109	111	127	9 331
Tr 130 × 14	14	130	123	114	116	132	10 207
(Tr 135 × 14)	14	135	128	119	121	137	11 122
Tr 140 × 6	6	140	137	133	134	141	13 893
Tr 140 × 14	14	140	133	124	126	142	12 076
Tr 140 × 24	24	140	128	114	116	142	10 207

[1] Uzeti su u obzir svi navoji prve prednosti (debelo tiskani), od navoja druge prednosti samo oni s prednosti (debelo tiskani), od navoja druge prednosti samo oni s prednosnim korakom.

Trapezni navoji (HRN M.B0.061/0.62 – 1977) (*konac*)

Oznaka [1]	P mm	d mm	$d_2 = D_2$ mm	d_3 mm	D_1 mm	D_4 mm	A mm²
(Tr 145 × 14)	14	145	138	129	131	147	13 070
Tr 150 × 16	16	150	142	132	134	152	13 685
(Tr 155 × 16)	16	155	147	137	139	157	14 741
Tr 160 × 6	6	160	157	153	154	161	18 385
Tr 160 × 16	16	160	152	142	144	162	15 837
Tr 160 × 28	28	160	146	130	132	162	13 273
(Tr 165 × 16)	16	165	157	147	149	167	16 972
Tr 170 × 16	16	170	162	152	154	172	18 146
(Tr 175 × 16)	16	175	167	157	159	177	19 359
Tr 180 × 8	8	180	176	171	172	181	22 966
Tr 180 × 18	18	180	171	160	162	182	20 106
Tr 180 × 28	28	180	166	150	152	182	17 671
(Tr 185 × 18)	18	185	176	165	167	187	21 382
Tr 190 × 18	18	190	181	170	172	192	22 698
(Tr 195 × 18)	18	195	186	175	177	197	24 053
Tr 200 × 8	8	200	196	191	192	201	28 652
Tr 200 × 20	20	200	191	180	182	202	25 447
Tr 200 × 33	33	200	184	166	168	202	21 642
Tr 210 × 20	20	210	200	188	190	212	27 759
Tr 220 × 8	8	220	216	211	212	221	34 967
Tr 220 × 20	20	220	210	198	200	222	30 791
Tr 220 × 36	36	220	202	182	184	222	26 016
Tr 230 × 20	20	230	220	208	210	232	33 979
Tr 240 × 8	8	240	236	231	232	241	41 910
Tr 240 × 22	22	240	229	216	218	242	36 644
Tr 240 × 36	36	240	222	202	204	242	32 047
Tr 250 × 22	22	250	239	226	228	252	40 115
Tr 260 × 12	12	260	254	247	248	261	47 916
Tr 260 × 22	22	260	249	236	238	262	43 744
Tr 260 × 40	40	260	240	218	220	262	37 325
Tr 270 × 24	24	270	258	244	246	272	46 759
Tr 280 × 12	12	280	274	267	268	281	55 990
Tr 280 × 24	24	280	268	254	256	282	50 671
Tr 280 × 40	40	280	260	238	240	282	44 488
Tr 290 × 24	24	290	278	264	266	292	54 739
Tr 300 × 12	12	300	294	287	288	301	64 692
Tr 300 × 24	24	300	288	274	276	302	58 965
Tr 300 × 44	44	300	278	254	256	302	50 671

[1] Uzeti su u obzir svi navoji prve prednosti (debelo tiskani), od navoja druge prednosti samo oni s prednosti (debelo tiskani), od navoja druge prednosti samo oni s prednosnim korakom.

Pilasti navoji (HRN M.B0.070 - 1981)

Profil pilastih navoja

Korak navoja P

Teorijska dubina navoja
$H = 1{,}732\,05\,P$

Dubina navoja na vijku
$H_1 = 0{,}867\,77\,P$

Dubina navoja na matici
(= nosiva dubina navoja)
$H_2 = 0{,}75\,P$

Zračnost
$b = 0{,}117\,77\,P$

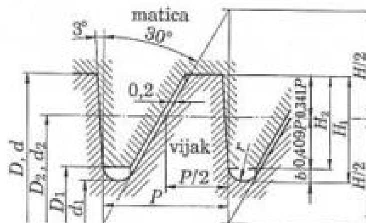
Zaobljenost
$r = 0{,}124\,27\,P$

Veliki promjer navoja
- vijka d
- matice $D = d$

Mali promjer navoja
- vijka $d_1 = d - 2H_1$
- matice $D_1 = D - 2H_2$

Srednji promjer
$d_2 = d + 1{,}050\,14\,P - H$
$= D_1 - 0{,}913\,96\,P + H$

Presjek jezgre
$A = d_1^2\,\pi/4$



Izmjere profila pilastog navoja

P / mm	H_1 / mm	H_2 / mm	b / mm	r / mm
2	1,736	1,5	0,236	0,249
3	2,603	2,25	0,353	0,373
4	3,471	3	0,471	0,497
5	4,339	3,75	0,589	0,621
6	5,207	4,5	0,707	0,746
7	6,074	5,25	0,824	0,870
8	6,942	6	0,942	0,994
9	7,810	6,75	1,060	1,118
10	8,678	7,5	1,178	1,243
12	10,413	9	1,413	1,491
14	12,149	10,5	1,649	1,740
16	13,884	12	1.884	1,988
18	15,620	13,5	1,120	2,237
20	17,355	15	2,355	2,485
22	19,091	16,5	2,591	2,734
24	20,826	18	2,826	2,982
26	22,562	19,5	3,062	3,231
28	24.298	21	3,298	3,480
32	27,769	24	3,769	3,977
36	31,240	27	4,240	4,474
40	34,711	30	4,711	4,971
44	38,182	33	5,182	5,468

Viševojni pilasti navoji

Korak navoja P n-vojnih pilastih navoja veći je n-puta od koraka jednovojnog navoja, dok sve druge izmjere navoja ostaju nepromijenjene.

Pilasti navoj rabimo za vretena koja mnogo rade, a prenose velike sile, ali samo u jednom smislu.

Razlikujemo tri prednosna stupnja pilastog navoja: prvi je za uobičajenu uporabu, drugi za iznimne slučajeve, a treći još samo u starim konstrukcijama.

Pilasti navoji prve prednosti

Oznaka [1]	P / mm	d / mm	d_1 / mm	d_2 / mm	D / mm	D_1 / mm	A / mm²
S 10 × **2**	2	10	6,528	8,636	10	7	33,5
S 12 × 2	2	12	8,528	10,636	12	9	57,1
S 12 × 3	3	12	6,794	9,954	12	7,5	36,3
S 16 × 2	2	16	12,528	14,636	16	13	123
S 16 × 4	4	16	9,058	13,272	16	10	64,4
S 20 × 2	2	20	16,528	18,636	20	17	215
S 20 × 4	4	20	13,058	17,272	20	14	134
S 24 × 3	3	24	18,794	21,954	24	19,5	277
S 24 × 5	5	24	15,322	20,590	24	16,5	184
S 24 × 8	8	24	10,116	18,545	24	12	80,4
S 28 × 3	3	28	22,794	25,954	28	23,5	408
S 28 × 5	5	28	19,322	24,545	28	20,5	293
S 28 × 8	8	28	14,116	22,545	28	16	156
S 32 × 3	3	32	26,794	29,954	32	27,5	564
S 32 × 6	6	32	21,586	27,909	32	23	370
S 32 × 10	10	32	14,644	25,181	32	17	168
S 36 × 3	3	36	30,794	33,954	36	31,5	745
S 36 × 6	6	36	25,586	31,909	36	27	514
S 36 × 10	10	36	18,644	29,181	36	21	273
S 40 × 3	3	40	34,794	37,954	40	35,5	951
S 40 × 7	7	40	27,852	35,227	40	29,5	609
S 40 × 10	10	40	22,644	33,181	40	25	403
S 44 × 3	3	44	38,794	41,954	44	39,5	1 182
S 44 × 7	7	44	31,852	39,227	44	33,5	797
S 44 × 12	12	44	23,174	35,817	44	26	422
S 48 × 3	3	48	42,794	45,954	48	43,5	1 438
S 48 × 8	8	48	34,116	42,545	48	36	914
S 48 × 12	12	48	27,174	39,817	48	30	580
S 52 × 3	3	52	46,794	49,954	52	47,5	1 720
S 52 × 8	8	52	38,116	46,545	52	40	1 141
S 52 × 12	12	52	31,174	43,817	52	34	763
S 60 × 3	3	60	54,794	57,954	60	55,5	2 358
S 60 × 9	9	60	44,380	53,863	60	46,5	1 547
S 60 × 14	14	60	35,702	50,453	60	39	1 001
S 70 × 4	4	70	63,058	67,272	70	64	3 123
S 70 × 10	10	70	52,644	63,181	70	55	2 177
S 70 × 16	16	70	42,232	59,089	70	46	1 401

[1] Ponajprije rabiti debelo označene navoje.

Pilasti navoji prve prednosti *(nastavak)*

Oznaka [1]	$\frac{P}{mm}$	$\frac{d}{mm}$	$\frac{d_1}{mm}$	$\frac{d_2}{mm}$	$\frac{D}{mm}$	$\frac{D_1}{mm}$	$\frac{A}{mm^2}$
S 80 × 4	4	80	73,058	77,272	80	74	4 192
S 80 × 10	10	80	62,644	73,181	80	65	3 082
S 80 × 16	16	80	52,232	69,089	80	56	2 143
S 90 × 4	4	90	83,058	87,272	90	84	5 418
S 90 × 12	12	90	69,174	81,817	90	72	3 758
S 90 × 18	18	90	58,760	77,726	90	63	2 712
S 100 × 4	4	100	93,058	97,272	100	94	6 801
S 100 × 12	12	100	79,174	91,817	100	82	4 923
S 100 × 20	20	100	65,290	86,362	100	70	3 348
S 120 × 6	6	120	109,586	115,909	120	111	9 432
S 120 × 14	14	120	95,702	110,453	120	99	7 193
S 120 × 22	22	120	81,818	104,998	120	87	5 258
S 140 × 6	6	140	129,586	135,909	140	131	13 189
S 140 × 14	14	140	115,702	130,453	140	119	10 514
S 140 × 24	24	140	98,348	123,634	140	104	7 597
S 160 × 6	6	160	149,586	155,909	160	151	17 574
S 160 × 16	16	160	132,232	149,089	160	136	13 733
S 160 × 28	28	160	111,404	140,907	160	118	9 747
S 180 × 8	8	180	166,116	174,545	180	168	21 673
S 180 × 18	18	180	148,760	167.726	180	153	17 381
S 180 × 28	28	180	131,404	160,907	180	138	13 562
S 200 × 8	8	200	186,116	194,545	200	188	27 206
S 200 × 18	18	200	168,760	187,726	200	173	22 368
S 200 × 32	32	200	144,462	178,179	200	152	16 391
S 220 × 8	8	220	206,116	214,545	220	208	33 367
S 220 × 20	20	220	185,290	206,362	220	190	26 965
S 220 × 36	36	220	157,520	195,451	220	166	19 488
S 240 × 8	8	240	226,116	234,545	240	228	40 156
S 240 × 22	22	240	201,818	224,998	240	207	31 990
S 240 × 36	36	240	177,520	215,451	240	186	24 751
S 260 × 12	12	260	139,174	251,817	260	242	44 928
S 260 × 22	22	260	221,818	244,998	260	227	38 644
S 260 × 40	40	260	190,578	232,724	260	200	28 526
S 280 × 12	12	280	259,174	271,817	280	262	52 756
S 280 × 24	24	280	138,348	263,634	280	244	44 618
S 280 × 40	40	280	210,578	252,724	280	220	34 827
S 300 × 12	12	300	279,174	291,817	300	282	61 213
S 300 × 24	24	300	258,348	283,634	300	264	52 420
S 300 × 44	44	300	223,636	269,996	300	234	39 280

[1] Ponajprije rabiti debelo označene navoje.

Pilasti navoji prve prednosti *(konac)*

Oznaka [1]	$\frac{P}{mm}$	$\frac{d}{mm}$	$\frac{d_1}{mm}$	$\frac{d_2}{mm}$	$\frac{D}{mm}$	$\frac{D_1}{mm}$	$\frac{A}{mm^2}$
S 340 × 12	12	340	319,174	331,817	340	322	80 010
S 340 × 44	44	340	263,636	309,996	340	274	54 588
S 380 × 12	12	380	359,174	371,817	380	362	101 321
S 420 × 18	18	420	388,760	407,726	420	393	118 701
S 460 × 18	18	460	428,760	447,726	460	433	144 384
S 500 × 18	18	500	468,760	487,726	500	473	172 580
S 540 × 24	24	540	498,348	523,634	540	504	195 053
S 580 × 24	24	580	538,348	563,634	580	544	227 622
S 620 × 24	24	620	578,348	603,634	620	584	262 704

Pilasti navoji druge prednosti [1]

S 14 × 2	S 38 × 3	S 75 × 4	S 170 × 6	S 290 × 12
S 14 × 3	**S 38 × 7**	**S 75 × 10**	**S 170 × 16**	**S 290 × 24**
	S 38 × 10	S 75 × 16	S 170 × 28	S 290 × 44
S 18 × 2	S 42 × 3	S 85 × 4	S 190 × 8	S 320 × 12
S 18 × 4	**S 42 × 7**	**S 85 × 12**	**S 190 × 18**	S 320 × 44
	S 42 × 10	S 85 × 18	S 190 × 32	S 360 × 12
S 22 × 3	S 46 × 3	S 95 × 4	S 210 × 8	
S 22 × 5	**S 46 × 8**	**S 95 × 12**	**S 210 × 20**	S 400 × 12
S 22 × 8	S 46 × 12	S 95 × 18	S 210 × 36	S 440 × 18
S 26 × 3	S 50 × 3	S 110 × 4	S 230 × 8	
S 26 × 5	**S 50 × 8**	**S 110 × 12**	**S 230 × 20**	S 480 × 18
S 26 × 8	S 50 × 12	S 110 × 20	S 230 × 36	
S 30 × 3	S 50 × 14	S 130 × 6	S 250 × 12	
S 30 × 6	**S 55 × 3**	**S 130 × 14**	**S 250 × 22**	S 520 × 24
S 30 × 10	S 55 × 9	S 130 × 22	S 250 × 40	S 560 × 24
S 34 × 3	S 65 × 4	S 150 × 6	S 270 × 12	
S 34 × 6	**S 65 × 10**	**S 150 × 16**	**S 270 × 24**	S 600 × 24
S 34 × 10	S 65 × 16	S 150 × 24	S 270 × 40	S 640 × 24

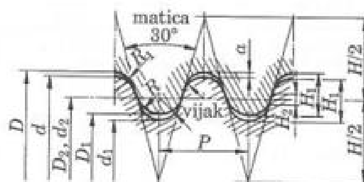
Pilasti navoji treće prednosti [1]

S 105 × 4	S 125 × 6	S 145 × 6	S 165 × 6	S 185 × 8
S 105 × 12	**S 125 × 14**	**S 145 × 14**	**S 165 × 16**	**S 185 × 18**
S 105 × 20	S 125 × 22	S 145 × 24	S 165 × 28	S 185 × 32
S 115 × 6	S 135 × 6	S 155 × 6	S 175 × 8	S 195 × 8
S 115 × 14	**S 135 × 14**	**S 155 × 16**	**S 175 × 16**	**S 195 × 18**
S 115 × 22	S 135 × 24	S 155 × 24	S 175 × 28	S 195 × 32

[1] Ponajprije rabiti debelo označene navoje.

Obli navoji (HRN M.B0.081 - 1952)

Profil oblih navoja



Broj navoja na 25,4 mm

n

Korak navoja (mm)

$P = 25{,}4/n$

Teorijska dubina navoja

$H = 1{,}866\,03\,P$

Dubina navoja vijka i matice

$H_1 = 0{,}5\,P$

Nosiva dubina navoja

$H_2 = 0{,}083\,50\,P$

Zračnost $a = 0{,}05\,P$

Zaobljenost - vijka $r = 0{,}238\,51\,P$

- matice $R = 0{,}255\,97\,P$

$R_1 = 0{,}221\,05\,P$

Izmjere profila oblog navoja

n	P / mm	H_1 / mm	H_2 / mm	r / mm	R / mm	R_1 / mm	a / mm
10	2,540	1,270	0,212	0,606	0,650	0,561	0,127 00
8	3,175	1,588	0,265	0,757	0,813	0,702	0,158 75
6	4,233	2,117	0,353	1,010	1,084	0,936	0,211 65
4	6,350	3,175	0,530	1,515	1,625	1,404	0,317 50

Veliki promjer navoja - vijka d

- matice $D = d + 2a$

Mali promjer navoja - vijka $d_1 = d - 2H_1$

- matice $D_1 = D - 2H_1$

Srednji promjer $d_2 = d - H_1 = d_1 + H_1$

Presjek jezgre $A = d_1^2\,\pi/4$

Obli normalni navoji (HRN M.B0,081 - 1952)

Oznaka	n	P / mm	d / mm	d_1 / mm	d_2 / mm	D / mm	D_1 / mm	A / mm²
Rd 8 × 1/10	10	2,540	8	5,460	6,730	8,254	5,714	23,4
Rd 9 × 1/10	10	2,540	9	6,460	7,730	9,254	6,714	32,8
Rd 10 × 1/10	10	2,540	10	7,460	8,730	10,254	7,714	43,7
Rd 11 × 1/10	10	2,540	11	8,460	9,730	11,254	8,714	56,2
Rd 12 × 1/10	10	2,540	12	9,460	10,730	12,254	9,714	70,3
Rd 14 × 1/8	8	3,175	14	10,825	12,412	14,318	11,142	92,0
Rd 16 × 1/8	8	3,175	16	12,825	14,412	16,318	13,142	129
Rd 18 × 1/8	8	3,175	18	14,825	16,412	18,318	15,142	172
Rd 20 × 1/8	8	3,175	20	16,825	18,412	20,318	17,142	222
Rd 22 × 1/8	8	3,175	22	18,825	20,412	22,318	19,142	278
Rd 24 × 1/8	8	3,175	24	20,825	22,412	24,318	21,142	340
Rd 26 × 1/8	8	3,175	26	22,825	24,412	26,318	23,142	409
Rd 28 × 1/8	8	3,175	28	24,825	26,412	28,318	25,142	484
Rd 30 × 1/8	8	3,175	30	26,825	28,412	30,318	27,142	565
Rd 32 × 1/8	8	3,175	32	28,825	30,412	32,318	29,142	652
Rd 36 × 1/8	8	3,175	36	32,825	34,412	36,318	33,142	846
Rd 40 × 1/6	6	4,233	40	35,767	37,883	40,423	36,190	1 005
Rd 44 × 1/6	6	4,233	44	39,767	41,883	44,423	40,190	1 242
Rd 48 × 1/6	6	4,233	48	43,767	45,883	48,423	44,190	1 505
Rd 52 × 1/6	6	4,233	52	47,767	49,883	52,423	48,190	1 792
Rd 55 × 1/6	6	4,233	55	50,767	52,883	55,423	51,190	2 024
Rd 60 × 1/6	6	4,233	60	55,767	67,883	60,423	56,190	2 443
Rd 65 × 1/6	6	4,233	65	60,767	62,883	65,423	61,190	2 900
Rd 70 × 1/6	6	4,233	70	65,767	67,883	70,423	66,190	3 397
Rd 75 × 1/6	6	4,233	75	70,767	72,883	75,423	71,190	3 933
Rd 80 × 1/6	6	4,233	80	75,767	77,883	80,423	76,190	4 509
Rd 85 × 1/6	6	4,233	85	80,767	82,883	85,423	81,190	5 123
Rd 90 × 1/6	6	4,233	90	85,767	87,883	90,423	86,190	5 777
Rd 95 × 1/6	6	4,233	95	90,767	92,883	95,423	91,190	6 471
Rd 100 × 1/6	6	4,233	100	95,767	97,883	100,423	96,190	7 203
Rd 110 × 1/4	4	6,350	110	103,650	106,825	110,635	104,285	8 438
Rd 120 × 1/4	4	6,350	120	113,650	116,825	120,635	114,285	10 145
Rd 130 × 1/4	4	6,350	130	123,650	126,825	130,635	124,285	12 008
Rd 140 × 1/4	4	6,350	140	133,650	136,825	140,635	134,285	14 029
Rd 150 × 1/4	4	6,350	150	143,650	146,825	150,635	144,285	16 207
Rd 160 × 1/4	4	6,350	160	153,650	156,825	160,635	154,285	18 542
Rd 170 × 1/4	4	6,350	170	163,650	166,825	170,635	164,285	21 034
Rd 180 × 1/4	4	6,350	180	173,650	176,825	180,635	174,285	23 683
Rd 190 × 1/4	4	6,350	190	183,650	186,825	190,635	184,285	26 489
Rd 200 × 1/4	4	6,350	200	193,650	196,825	200,635	194,285	29 453

Obli grubi navoj za željeznička vozila (HRN M.B0.082 – 1952)

Taj se navojni profil razlikuje od profila normalnoga oblog navoja time što mu kut nosivih površina teorijskog profila iznosi 15° 56′.

Izmjere grubog oblog navoja:

P = 7 mm

H_1 = 4,5 mm

r = 1,65 mm

R = 1,55 mm

R_1 = 1,75 mm

Oznaka	d / mm	d_1 / mm	d_2 / mm	D / mm	D_1 / mm	D_2 / mm	A / mm²
Rd 34 × 7	34	25	29,5	34,4	25,4	31,143	491
Rd 39 × 7	39	30	34,5	39,4	30,4	36,143	707
Rd 44 × 7	44	35	39,5	44,4	35,4	41,143	962
Rd 49 × 7	49	40	44,5	49,4	40,4	46,143	1 256
Rd 54 × 7	54	45	49,5	54,4	45,4	51,143	1 590
Rd 59 × 7	59	50	54,5	59,4	50,4	56,143	1 963
Rd 64 × 7	64	55	59,5	64,4	55,4	61,143	2 376
Rd 69 × 7	69	60	64,5	69,4	60,4	66,143	2 827
Rd 74 × 7	74	65	69,5	74,4	65,4	71,143	3 318
Rd 79 × 7	79	70	74,5	79,4	70,4	76,143	3 848

Obli navoj za željezničke spojke (HRN M.B0,083 – 1952)

Profil toga navoja u načelu je isti kao u normalnoga oblog navoja s promjerom vijka 50 mm i korakom navoja 7 mm:

Oznaka: Rd 50 × 7 (odn. Rd 50 × 7 lijevi)

Izmjere:

P = 7 mm	d = 50 mm
H_1 = 3,5 mm	d_1 = 43 mm
H_2 = 0,75 mm	d_2 = 46,5 mm
r = 1,67 mm	D = 50,6 mm
R = 1,635 mm	D_1 = 43,6 mm
R_1 = 1,704 mm	D_2 = 47,3 mm

(D_2 je srednji promjer matice.)

Navoji za bicikle (HRN M.B0,95 – 1957)

Profil navoja

Broj navoja na 25,4 mm n

Korak navoja (mm) $P = 25{,}4/n$

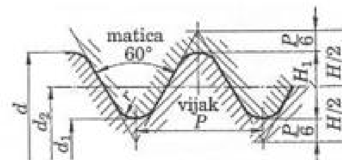
Dubina navoja $H_1 = 0{,}5327\,P$

Zaobljenost $r = P/6$

Veliki promjer d

Srednji promjer $d_2 = d - H_1$

Mali promjer $d_1 = d - 2\,H_1$



Oznaka	d / mm	n	P / mm	H_1 / mm	r / mm	d_2 / mm	d_1 / mm
Bi 3/8	9,525	26	0,977	0,520	0,163	9,004	8,484
Bi 0,415	10,550	26	0,977	0,520	0,163	10,029	9,509
Bi 9/16	14,288	20	1,270	0,677	0,212	13,611	12,934
Bi 1,29	32,766	24	1,058	0,564	0,176	32,202	31,638
Bi 1,37	34,798	24	1,058	0,564	0,176	34,234	33,670

Edisonovi navoji (HRN M.B0.086 – 1952)

Profil navoja

Broj navoja na 25,4 mm n

Korak navoja (mm) $P = 25{,}4/n$

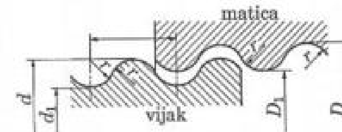
Zaobljenost r

Veliki promjer vijka d

Mali promjer vijka d_1

Veliki promjer matice D

Mali promjer matice D_1



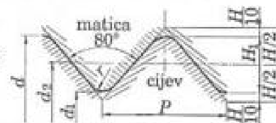
Oznaka	n	P / mm	r / mm	d [1] / mm	d_1 [1] / mm	D [1] / mm	D_1 [1] / mm
E 10	14	1,814	0,531	9,53 9,36	8,51 8,34	9,78 9,61	8,76 8,59
E 14	9	2,822	0,822	13,89 13,70	12,29 12,10	14,16 13,97	12,56 12,37
E 27	7	3,629	1,025	26,45 26,15	24,26 23,96	26,85 26,55	24,66 24,36
E 33	6	4,233	1,187	33,05 32,65	30,45 30,05	33,55 33,15	30,95 30,55
E 40	4	6,350	1,850	39,50 39,05	35,90 35,45	40,05 39,60	36,45 36,00

[1] Gornji i donji brojevi označuju granične vrijednosti.

Navoji za oklopne cijevi (HRN M.B0.090 - 1952)

Profil navoja

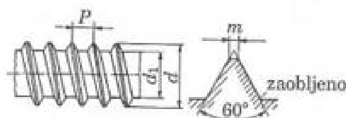
Broj navoja na 25,4 mm n
Korak navoja (mm) $P = 25{,}4/n$
Teorijska dubina navoja $H = 0{,}595\ 875\ P$
Stvarna dubina navoja $H_1 = 0{,}476\ 7\ P$
Zaobljenost $r = 0{,}107\ P$
Veliki promjer navoja d
Mali promjer navoja $d_1 = d - 2\ H_1$
Srednji promjer navoja $d_2 = d - H_1$



Izmjere profila navoja za oklopne cijevi

Oznaka	n	P mm	d mm	d_1 mm	d_2 mm	H_1 mm	r mm
Re 7	20	1,27	12,50	11,28	11,89	0,61	0,14
Re 9	18	1,41	15,20	13,86	14,53	0,67	0,15
Re 11	18	1,41	18,60	17,26	17,93	0,67	0,15
Re 13,5	18	1,41	20,40	19,06	19,73	0,67	0,15
Re 16	18	1,41	22,50	21,16	21,83	0,67	0,15
Re 21	16	1,588	28,30	26,78	27,54	0,76	0,17
Re 29	16	1,588	37,00	35,48	36,24	0,76	0,17
Re 36	16	1,588	47,00	45,48	46,24	0,76	0,17
Re 42	16	1,588	54,00	52,48	53,24	0,76	0,17
Re 48	16	1,588	59,30	57,78	58,54	0,76	0,17

Navoji samoreznih vijaka (HRN M.B0.100 - 1983)



Profil navoja
Veliki promjer d
Mali promjer d_1
Korak navoja P
Širina vrha navoja m

Oznaka	d mm	d_1 mm	P mm	m mm
Nl 2,2	2,2	1,6	0,79	0,1
Nl 2,9	2,9	2,2	1,06	0,1
Nl 3,5	3,5	2,6	1,27	0,1
Nl 3,9	3,9	2,9	1,34	0,1
Nl 4,2	4,2	3,1	1,41	0,1
Nl 4,8	4,8	3,6	1,59	0,15
Nl 5,5	5,5	4,2	1,81	0,15
Nl 6,3	6,3	4,9	1,81	0,15
Nl 8	8	6,2	2,12	0,15
Nl 9,6	9,6	7,8	2,12	0,15

DOPUŠTENA NAPREZANJA

U konstrukcijama se ne smiju pojaviti trajne plastične deformacije, već cijela konstrukcija mora trajno ostati u području elastičnih deformacija. Znači, dopuštena naprezanja u tvari ne smiju prijeći granicu elastičnosti. No, zbog sigurnosti (u slučaju pojavljivanja nepredvidivih dodatnih opterećenja, npr. dinamičkih) tvar nećemo naprezati ni do granice elastičnosti. (Iznimke su iznimni slučajevi, kad određenom plastičnom deformacijom postižemo djelomično otvrdivanje tvari.)

U praksi su uvedena dopuštena naprezanja, određena faktorom sigurnosti ν, tj. omjerom (vlačne) čvrstoće i dopuštenog naprezanja tvari. Taj se faktor mijenja - prema zahtijevanoj sigurnosti - od 2 do 10.

Dopušteno naprezanje

$$\sigma_{dop} = R_m/\nu$$

ovisi o osnovnim vrstama opterećenja pa razlikujemo dopuštena naprezanja na:

vlak	σ_{dop}
tlak	σ_{dop}
savijanje	$\sigma_{f\,dop}$
smik (tangencijalno)	$\tau_{s\,dop}$
torziju (uvijanje)	$\tau_{t\,dop}$

Dopušteno naprezanje, dakako, veoma ovisi o posebnim čimbenicima koji utječu na čvrstoću tvari, napose o čimbeniku oblika te o trajnom (statičkom i dinamičkom) opterećenju (v. str. 604 i 609).

Za određivanje dopuštenog naprezanja iznimno je važno stanje tvari. Zdrava tvar mora biti homogena i ne smije imati unutarnjih grješaka (šupljina, mjehura, nakupina itd.), koje smanjuju nosive presjeke i mogu izazvati znatna zarezna naprezanja.

Osim toga, treba pri određivanju dopuštenog naprezanja uzeti u obzir još i druge okolnosti koje utječu na čvrstoću, kao što je npr. smanjenje presjeka zbog gubitka tvari pri trošenju, koroziji itd.

Za proračunavanje konstrukcijskih dijelova jednostavnih i iskušanih oblika, na koje djeluju potpuno poznata opterećenja, možemo uporabiti dopušteno iskustveno naprezanje određeno za slične slučajeve. Tako postupamo u praksi pri proračunu jednostavnih strojnih elemenata uzimajući dopuštena naprezanja prema iskustvu (predočeno u tablicama na str. 600 ... 602). Pri proračunu čeličnih konstrukcija uzimamo za njih posebna dopuštena naprezanja (v. tablicu na str. 603).

Međutim, za sve novooblikovane konstrukcijske dijelove, napose za složene oblike i opterećenja, takav način proračunavanja nije više dostatan. U takvim slučajevima treba čvrstoću i dopuštena naprezanja odrediti posebnim temeljitim proračunima i ispitivanjima.

Dopuštena naprezanja najvažnijih kovinskih tvari

U sljedećim tablicama znače:

$R_{p\,0,2}$ – (dogovorno) naprezanje tečenja
R_m – čvrstoću na vlak
σ_{Df} – trajnu dinamičku čvrstoću za savijanje (slučaj III)
σ_{dop} – dopušteno naprezanje na tlak, i to:
I – pri mirnom opterećenju
II – pri kolebanju opterećenja između najveće vrijednosti i ništice
III – pri kolebanju opterećenja između pozitivne i negativne najveće vrijednosti.

Sva naprezanja vrijede pri temperaturi okolice.

Dopuštena naprezanja najvažnijih kovinskih naprezanja

Oznaka HRN	$R_{p\,0,2}$ N/mm²	R_m N/mm²	σ_{Df} N/mm²	I σ_{dop} N/mm²	II σ_{dop} N/mm²	III σ_{dop} N/mm²
Sivi lijev (HRN C.J2.020 – 1973) – neobrađen						
SL 15	–	110 ... 180	60 ... 80	40 ... 55	30 ... 45	25 ... 30
SL 20	–	160 ... 230	75 ... 110	55 ... 70	45 ... 60	25 ... 40
SL 25	–	210 ... 280	100 ... 140	80 ... 100	60 ... 80	40 ... 60
SL 30	–	250 ... 300	110 ... 160	80 ... 110	65 ... 90	40 ... 70
Temperirani lijev (HRN C.J2.021 – 1958)						
BTeL 35	–	320 ... 360	110 ... 140	80 ... 110	50 ... 80	40 ... 50
BTeL 40	200 ... 240	380 ... 410	130 ... 170	90 ... 120	60 ... 90	45 ... 60
CTeL 35	–	350 ... 380	80 ... 110	70 ... 85	40 ... 60	30 ... 40
CTeL 38	200 ... 240	380 ... 400	100 ... 130	80 ... 100	50 ... 75	35 ... 50
Čelični lijev (HRN C.J3.011 – 1973) – normalno žaren						
ČL 0300	180 ... 230	380 ... 450	160 ... 190	100 ... 130	80 ... 110	50 ... 75
ČL 0400	220 ... 280	450 ... 520	180 ... 220	110 ... 160	90 ... 120	60 ... 85
ČL 0500	250 ... 320	520 ... 600	200 ... 240	130 ... 180	100 ... 130	70 ... 95
ČL 0600	280 ... 360	600 ... 700	220 ... 260	140 ... 200	110 ... 150	80 ... 110
Opći konstrukcijski čelici (HRN C.B0.500 – 1970 i 1972) – normalno žareni						
Č 0261	200 ... 230	340 ... 420	160 ... 200	110 ... 130	90 ... 120	75 ... 95
Č 0361	220 ... 250	370 ... 450	170 ... 200	120 ... 140	100 ... 130	80 ... 100
Č 0461	240 ... 280	420 ... 500	190 ... 250	130 ... 150	110 ... 140	90 ... 110
Č 0561	340 ... 420	520 ... 620	300 ... 350	180 ... 210	140 ... 180	110 ... 150
Č 0545	280 ... 340	500 ... 600	220 ... 270	150 ... 180	120 ... 160	95 ... 120
Č 0645	320 ... 380	600 ... 720	280 ... 330	180 ... 210	150 ... 185	105 ... 140
Č 0745	340 ... 420	700 ... 850	300 ... 380	210 ... 250	160 ... 200	115 ... 170

Dopuštena naprezanja najvažnijih kovinskih naprezanja (*nastavak*)
Značenje oznaka naprezanja – v. str. 600
Sva naprezanja vrijede pri temperaturi okolice.

Oznaka HRN	$R_{p\,0,2}$ N/mm²	R_m N/mm²	σ_{Df} N/mm²	I σ_{dop} N/mm²	II σ_{dop} N/mm²	III σ_{dop} N/mm²
Čelici za cementiranje (HRN C.B9.020 – 1974) – nakon kaljenja (Podatci vrijede za svojstva jezgre pri debljini ispitnog uzorka od 15 do 40 mm)						
Č 1120 Č 1121	250 ... 300	420 ... 520	220 ... 280	110 ... 150	90 ... 120	70 ... 90
Č 1220 Č 1221	300 ... 360	500 ... 650	250 ... 300	140 ... 170	120 ... 150	90 ... 110
Č 4120	400 ... 600	600 ... 850	300 ... 360	200 ... 260	140 ... 200	120 ... 170
Č 4320	600 ... 800	800 ... 1100	320 ... 400	300 ... 360	230 ... 320	150 ... 220
Č 4321	700 ... 950	1000 ... 1300	350 ... 420	320 ... 420	260 ... 360	180 ... 240
Č 4721	750 ... 950	1100 ... 1450	360 ... 460	320 ... 420	250 ... 350	160 ... 250
Č 5420	650 ... 800	900 ... 1200	320 ... 420	300 ... 380	240 ... 330	160 ... 230
Č 5421	800 ... 1000	1200 ... 1450	400 ... 480	340 ... 440	270 ... 370	190 ... 260
Čelici za poboljšanje (HRN C.B9.021 – 1974) – poboljšani						
Č 1330 Č 1331	300 ... 380	500 ... 650	220 ... 270	140 ... 170	120 ... 150	90 ... 115
Č 1430 Č 1431	330 ... 450	550 ... 800	270 ... 320	170 ... 200	130 ... 170	100 ... 125
Č 1530 Č 1531	360 ... 500	600 ... 850	300 ... 340	190 ... 220	150 ... 200	110 ... 150
Č 1730 Č 1731	440 ... 600	700 ... 1000	340 ... 400	220 ... 260	170 ... 240	130 ... 170
Č 3130	500 ... 650	750 ... 1000	360 ... 480	260 ... 330	200 ... 260	160 ... 230
Č 4130	550 ... 800	800 ... 1050	400 ... 500	280 ... 350	220 ... 280	180 ... 250
Č 4131	550 ... 800	800 ... 1100	400 ... 500	300 ... 360	230 ... 290	200 ... 250
Č 4730	450 ... 700	700 ... 1050	320 ... 400	210 ... 270	150 ... 200	130 ... 180
Č 4731	550 ... 800	800 ... 1100	380 ... 480	260 ... 330	200 ... 250	170 ... 230
Č 4732	650 ... 900	950 ... 1200	460 ... 550	300 ... 380	230 ... 280	200 ... 260
Č 4733	700 ... 950	1000 ... 1350	500 ... 580	320 ... 280	230 ... 280	120 ... 260
Č 4734	800 ... 1100	1100 ... 1450	520 ... 650	320 ... 400	240 ... 300	220 ... 280
Č 4830	650 ... 950	500 ... 1250	450 ... 580	310 ... 380	250 ... 300	200 ... 270
Č 5430	650 ... 900	950 ... 1200	480 ... 580	300 ... 380	230 ... 280	200 ... 260
Č 5431	700 ... 950	1000 ... 1350	500 ... 600	320 ... 380	240 ... 280	210 ... 260
Č 5432	800 ... 1100	1100 ... 1450	520 ... 620	320 ... 400	250 ... 300	220 ... 280

Dopuštena naprezanja najvažnijih kovinskih naprezanja (*konac*)
Značenje oznaka naprezanja – v. str. 600
Sva naprezanja vrijede pri temperaturi okolice.

Oznaka HRN [1]		$\frac{R_{p\,0,2}}{N/mm^2}$	$\frac{R_m}{N/mm^2}$	$\frac{\sigma_{Df}}{N/mm^2}$	I $\frac{\sigma_{dop}}{N/mm^2}$	II $\frac{\sigma_{dop}}{N/mm^2}$	III $\frac{\sigma_{dop}}{N/mm^2}$
Čelici za opruge (HRN C.B0.551 – 1984) – poboljšani							
Č 2133		1100 ... 1400	1300 ... 1500	550 ... 650	720 ... 880	420 ... 500	300 ... 380
Č 4830		1200 ... 1600	1350 ... 1700	580 ... 700	750 ... 900	420 ... 520	320 ... 400
Aluminijske slitine za lijevanje (HRN C:C2.300 – 1983)							
Al Si 12.01		70 ... 90	140 ... 200	60 ... 90	40 ... 70	30 ... 60	20 ... 40
Al Si 12.02		90 ... 110	150 ... 200	70 ... 100	40 ... 70	30 ... 60	20 ... 40
Al Si 6 Cu4.01		100 ... 150	160 ... 200	60 ... 90	40 ... 70	30 ... 60	20 ... 40
Al Si 6 Cu4.02		110 ... 160	170 ... 220	70 ... 100	40 ... 70	30 ... 60	20 ... 40
Al Mg 5 Si.01		90 ... 100	170 ... 250	60 ... 80	40 ... 70	30 ... 60	20 ... 40
Aluminijske slitine za gnječenje (HRN C:C2.100 – 1967)							
Al Cu4 Si Mg	m	80 ... 140	180 ... 220	80 ... 120	50 ... 90	40 ... 60	30 ... 40
	o	220 ... 320	280 ... 450	120 ... 180	90 ... 130	60 ... 90	50 ... 70
Al Si1 Mg	m	50 ... 80	110 ... 150	50 ... 70	30 ... 50	20 ... 40	20 ... 30
	o	150 ... 210	170 ... 290	70 ... 130	60 ... 110	40 ... 70	30 ... 60
Al Mg2	m	70 ... 120	180 ... 220	70 ... 120	50 ... 80	30 ... 60	30 ... 50
	h	140 ... 180	230 ... 260	100 ... 170	70 ... 110	50 ... 70	40 ... 60
Čisti bakar (HRN C.D1.002 – 1972)							
Cu – ljevan		70 ... 120	140 ... 200	40 ... 50	30 ... 40	20 ... 30	10 ... 20
– žaren		40 ... 80	200 ... 250	80 ... 110	30 ... 40	30 ... 50	20 ... 40
– vučen		300 ... 40	380 ... 440	100 ... 120	90 ... 120	40 ... 60	20 ... 40
Bakrene slitine za lijevanje (HRN C.D2.300/301 – 1982)							
P.CuZn33Pb2.01		60 ... 80	150 ... 200	50 ... 70	20 ... 40	20 ... 30	20
K.CuZn40Pb.02		80 ... 150	250 ... 350	70 ... 100	30 ... 50	20 ... 40	20 ... 30
Bakrene slitine za gnječenje (HRN C.D2. 100/101/102 – 1982)							
Cu Zn 39 Pb2	m	100 ... 150	370 ... 480	130 ... 170	80 ... 90	60 ... 80	50 ... 60
	t	120 ... 160	510 ... 610	180 ... 220	120 ... 150	90 ... 110	70 ... 80
Cu Zn28	m	70 ... 100	250 ... 300	90 ... 120	50 ... 60	40 ... 50	30 ... 40
	t	210 ... 260	380 ... 460	140 ... 180	100 ... 130	70 ... 90	50 ... 60
Cu Zn10	m	70 ... 100	240 ... 290	80 ... 120	50 ... 60	40 ... 60	30 ... 50
	t	220 ... 280	350 ... 430	140 ... 180	110 ... 140	70 ... 90	50 ... 70
Cu Sn6		–	360 ... 420	120 ... 150	90 ... 120	70 ... 90	50 ... 70

[1] Posebne oznake znače: m – meko, t – tvrdo, o – očvrsnuto, h – hladno očvrsnuto.

Dopušteno naprezanje za čelične konstrukcije

Dopušteno naparezanje za kovinske dijelove

Sastavni dio konstrukcije		Dopušteno naprezanje na vlak $\frac{\sigma_{dop}}{N/mm^2}$		tlak $\frac{-\sigma_{dop}}{N/mm^2}$		smik $\frac{\tau_{dop}}{N/mm^2}$		Bočni tlak [1] $\frac{p_{dop}}{N/mm^2}$	
		a	b	a	b	a	b	a	b
Nosači	od Č 0000	120	120	120	120	96	96		
	od Č 0370	140	160	140	160	112	128		
Zakovice u nosačima	od Č 0246								
	od Č 0000					120	120	240	240
	od Č 0370					140	160	280	320
Vijci u nosačima	od Č 0246								
	od Č 0000	85	85			96	96	240	240
	od Č 0370	100	110			112	128	280	320
Temeljni vijci	od Č 0000	85	85						
	Č 0370	100	110						
Dijelovi ležaja i zglobova	od Č 1430	200	220	200	220			950	1200
	ČL 0501	180	200	180	200			850	1000
	SL 15	45	50	100	110			500	600

Vrijednosti u tablici vrijede pri temperaturi okolice 20 °C, i to:

a) za opterećenje glavnim silama: vlastitom težinom, korisnom težinom, težinom snijega;

b) za opterećenje koje se ne sastoji samo od glavnih sila (kao pod a), već i od dodatnih: sile vjetra, kočne sile, horizontalnih bočnih sila, sile zbog toplinskog rastezanja.

Odlučujući je onaj proračun opterećenja koji daje veće nosive presjeke.

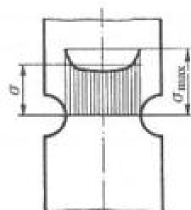
*

Dopušteno naprezanje za nekovinske tvari

Tvar		Modul elastičnosti $\frac{E}{N/mm^2}$	Dopuštena naprezanja na vlak $\frac{\sigma_{dop}}{N/mm^2}$	tlak $\frac{-\sigma_{dop}}{N/mm^2}$	savijanje $\frac{\sigma_{f\,dop}}{N/mm^2}$	smik $\frac{\tau_{s\,dop}}{N/mm^2}$
Drvo						
hrast, bukva	∥	14 000	10,5	7 ... 12	8 ... 14	1
	⊥	1 000	0,5	3	–	2,5
zimzelen	∥	11 000	9	6 ... 11	7 ... 13	0,9
	⊥	550	0,3	2	–	1
Beton nearmiran		14 000 ... 36 000	–	1,5 ... 8	–	–

[1] Pod »bočnim tlakom« podrazumijevamo tlak zakovice ili vijka na dosjednu površinu provrta (rupe).

Utjecaj oblika predmeta

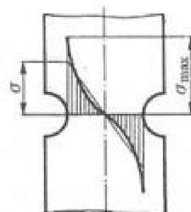


Razdioba naprezanja pri vlaku

Kod predmeta, kojima se presjek znatno mijenja, nije razdioba naprezanja više jednolična po cijelom presjeku, već se na mjestima promjene presjeka (osobito pri naglim prijelazima), javlja znatno veće naprezanje σ_{max} koje može biti nekoliko puta veće od nazivnog naprezanja σ, koje zamišljamo jednolično raspodijeljenim po cjelokupnom presjeku.

»Faktor oblika« α_k

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} = 1 \dots 3 \ (\dots 10).$$



Razdioba naprezanja pri savijanju

Faktor oblika α_k praktički ovisi samo o načinu opterećenja i vanjskom obliku predmeta, a osobito o dubini zareza i zakrivljenosti njegova tjemena, dakle općenito o oštrini zareza. U običnim slučajevima faktor oblika dostiže vrijednost 3, a u iznimnim slučajevima i do 10.

Veliki je porast naprezanja zbog oblika doveo nužno do opsežnih sustavnih ispitivanja »zarezne čvrstoće«.

Pri mirnom opterećenju većina žilavih tvari nije posebno osjetljiva na zarezna naprezanja, tako da vršna opterećenja često ne treba ni uzimati u obzir pa možemo računati s nazivnim naprezanjem, koje zamišljamo jednolično raspodijeljenim po cijelom presjeku.

Osjetljivost čelika prema zareznom naprezanju je veća ako mu je granica plastičnosti veća, pa je prema zarezima tvrdi čelik više osjetljiv od mekog.

Lijevano željezo praktički nije osjetljivo prema zareznim naprezanjima zbog svojih »unutarnjih zareza« (grafitni listići!).

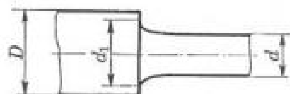
Zarezna se osjetljivost jako povećava ako opterećenje nije mirno, kao što je to npr. pri djelovanju udaraca. U tom slučaju govorimo o »dinamičkoj ili udarnoj zareznoj čvrstoći«.

Općenito se pri promjenljivom opterećenju znatno povećava osjetljivost za zarezna naprezanja, što nužno traži daljnje istraživanje o razdiobi naprezanja.

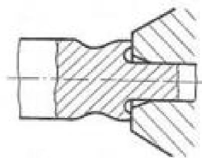
Faktor oblika α_k za najobičnije slučajeve

Oblik zareza	Vrsta opterećenja	Nazivno naprezanje	$\frac{r}{D}$	Faktor oblika α_k za h/D = 0,025	0,05	0,1	0,2
(ØD, h, r, F, M_f, T)	vlak	$\frac{4F}{\pi(D-2h)^2}$	0,01	2,1	2,4	2,6	2,64
			0,05	1,55	1,85	1,95	1,9
			0,1	1,38	1,55	1,7	1,58
			0,2	1,26	1,35	1,45	1,4
	savijanje	$\frac{32 M_f}{\pi(D-2h)^3}$	0,01	2,0	2,22	2,3	2,2
			0,05	1,5	1,7	1,78	1,65
			0,1	1,32	1,43	1,48	1,42
			0,2	1,23	1,25	1,3	1,3
	torzija	$\frac{16 T}{\pi(D-2h)^3}$	0,01	1,5	1,6	1,65	1,65
			0,05	1,22	1,35	1,4	1,3
			0,1	1,13	1,2	1,3	1,2
			0,2	1,1	1,13	1,12	1,1
(a, b, h, r, F, M_f)	vlak	$\frac{F}{b(a-2h)}$	0,01	2,2	2,5	2,8	2,9
			0,05	1,65	1,95	2,1	2,15
			0,1	1,45	1,6	1,8	1,7
			0,2	1,35	1,45	1,55	1,5
	savijanje	$\frac{6 M_f}{b(a-2h)^2}$	0,01	2,05	2,3	2,5	2,3
			0,05	1,55	1,8	1,85	1,8
			0,1	1,4	1,5	1,5	1,45
			0,2	1,25	1,3	1,3	1,28
(a, b, h, r, F, M_f)	vlak	$\frac{F}{b(a-h)}$	0,025	1,8	2,0	2,15	2,18
			0,05	1,55	1,8	1,88	1,88
			0,1	1,32	1,55	1,6	1,6
			0,2	1,23	1,28	1,4	1,4
	savijanje	$\frac{6 M_f}{b(a-h)^2}$	0,025	1,92	2,2	2,45	2,58
			0,05	1,6	1,95	2,15	2,25
			0,1	1,42	1,62	1,81	1,9
			0,2	1,31	1,43	1,52	1,6
(a, b, h, F, M_f)	vlak	$\frac{F}{b(a-2h)}$	$=\frac{h}{a}$		2,15	2,1	2,03
	savijanje	$\frac{3 M_f h}{2b\left(\frac{a}{2}\right)^3 - h^3}$	$=\frac{h}{a}$		1,58	1,62	1,64

Da smanjimo zarezno naprezanje σ_{max}, u konstrukcijama se dosljedno klonimo oštrih zareza i prijelaza pa izvodimo što je moguće postupnije prijelaze:



– postupni prijelaz (paraboličnog ili barem kružnog oblika) od promjera d do promjera d_1



– rasterećeni prijelaz sa zaobljenom udubinom na predmetima gdje se ne može načiniti pristupni prijelaz.

Ne možemo li izbjeći oštar prijelaz, valja takvo mjesto pojačati većim izmjerama ili uporabiti čvršću tvar, kako bismo uspješno spriječili zarezno djelovanje.

Utjecaj trajanja opterećenja

Pri opterećivanju do određenog naprezanja ne moraju se sve deformacije pojaviti odmah, već djelomice tek nakon duljeg vremena. Tu pojavu vremenskog zaostajanja deformacija iza opterećenja nazivamo puzanjem tvari.

Puzanje sprječavamo manjim opterećenjem tvari od dopuštenog za kratkotrajno opterećenje. Čvrstoća tvari ovisi o trajanju opterećenja pa je ona to manja što opterećenje dulje traje. Svakom trajanju opterećenja odgovara određena čvrstoća tvari, a nazivamo je *vremenskom statičkom čvrstoćom*.

Pri manjem opterećenju puzanje može prestati. Odgovarajuću čvrstoću tvari koja više ne ovisi o trajanju opterećenja nazivamo *trajnom statičkom čvrstoćom* (v. str. 360)

Utjecaj promjenljivog opterećenja

Čvrstoća tvari znatno opada ako opterećenje nije jednolično, već se neprestano mijenja (koleba; titra). To kolebanje opterećenja uzrokuje i kolebanje naprezanja u tvari.

Pri promjenljivom naprezanju čvrstoća se smanjuje s povećanjem broja titraja. Pri vrlo velikom broju titraja čvrstoća se približava vrijednosti pri kojoj više ne ovisi o broju titraja. Nazivamo je »dinamičkom čvrstoćom« (v. str. 361).

Dinamička čvrstoća ovisi o tome kako se kolebaju naprezanja. Najčešće određujemo »pulsirajuću (titranju) dinamičku čvrstoću«, pri kolebanju naprezanja od 0 do neke vrijednosti vlaka ili tlaka, i »njihajnu (kolebljivu) dinamičku čvrstoću«, pri kolebanju naprezanja između apsolutno jednakih vrijednosti vlaka i tlaka.

Dijagrami dinamike čvrstoće (Smithovi dijagarami, str. 361) za neke konstrukcijske čelike predočeni su na str. 607 ... 609.

Dijagrami dinamičke čvrstoće

U dijagramima dinamičke čvrstoće nekih konstrukcijskih čelika označene krivulje predočuju

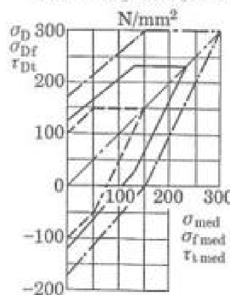
———— σ_D vlak i tlak

—·—·—·— σ_{Df} savijanje

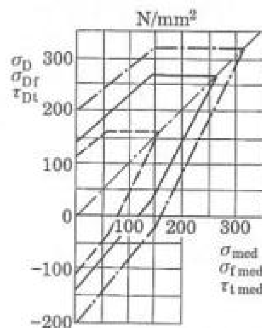
— — — τ_{Dt} torziju

i to ovisno o srednjim naprezanjima σ_{med}, $\sigma_{f\,med}$, $\tau_{t\,med}$.

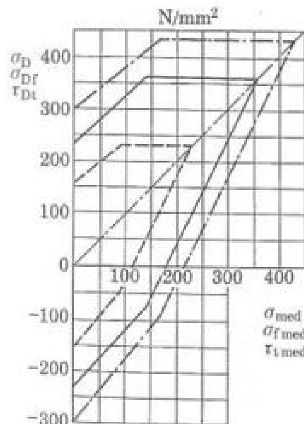
Sva su naprezanja u dijagramima predočena u N/mm².



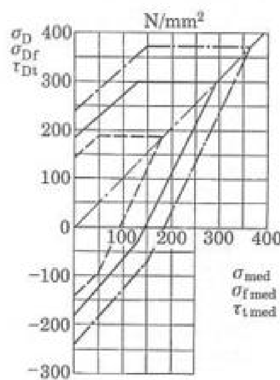
Obični konstrukcijski čelik Č 0361



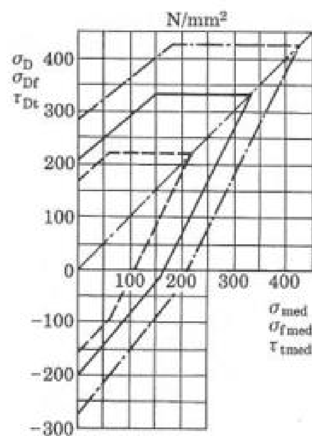
Obični konstrukcijski čelik Č 0461



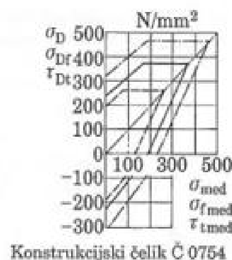
Obični konstrukcijski čelik Č 0561



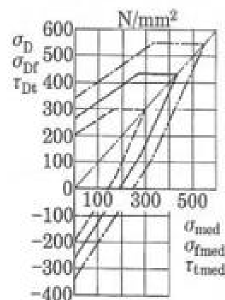
Konstrukcijski čelik Č 0561



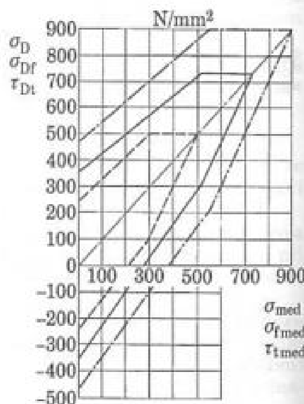
Konstrukcijski čelik Č 0645



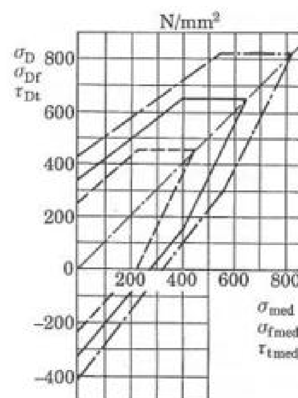
Konstrukcijski čelik Č 0754



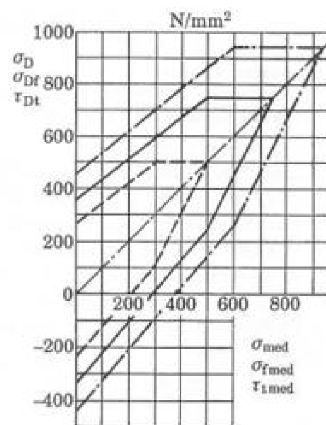
Nelegirani čelik za poboljšanje Č 1530



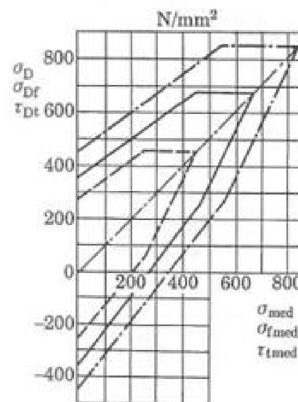
Malo legirani Mn-Si čelik za poboljšanje Č 3130



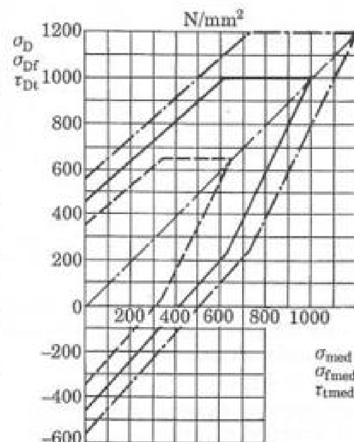
Legirani Cr čelik za poboljšanje Č 4130



Legirani Cr-V čelik za poboljšanje Č 4830



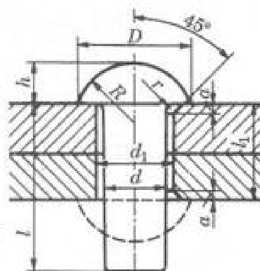
Legirani Cr-Mo čelik za poboljšanje Č 4731



Legirani Cr-Mo-V čelik za poboljšanje Č 4734

Zakovični spojevi

Zakovice s poluokruglom glavom



– za čelične konstrukcije
 (HRN M.B3.021 – 1984), (lijevi dio slike)
– za kotlove pod tlakom (desni dio slike).

Nazivni promjer (sirove) zakovice d

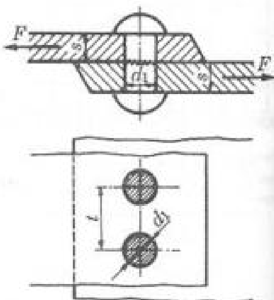
Promjer zakovane zakovice d_1

Presjek zakovane zakovice $A = d_1^2\,\pi/4$

Izmjere zakovica se predočene su u tablici. Duljina sirove zakovice l ovisi o ukupnoj debljini limova l_1.

		Zakovice za čelične konstrukcije				Zakovice za kotlove pod tlakom					
d mm	d_1 mm	D mm	h mm	R mm	r mm	D mm	h mm	R mm	r mm	a mm	A mm²
10	11	16	6,5	8	0,4	18	7	9,5	1	1	95
13	14	21	8,5	11	0,6	23	9	12	1,5	1,5	154
16	17	26	10	13,5	0,8	30	12	15,5	2	2	227
19	20	30	12	15,5	0,8	35	14	18	2	2	314
22	23	35	14	18	1	40	16	20,5	2	2	415
25	26	40	16	20,5	1	45	18	23	2,5	2,5	531
28	29	45	18	23	1	50	20	25,5	3	3	661
31	32	50	20	25,5	1,5	55	22	28	3	3	804
34	35	55	22	28	1,5	60	24	30,5	3,5	3,5	962
37	38	60	24	30,5	1,5	67	26	34,5	4	4	1134

Proračun zakovičnih spojeva



Zakovice računamo s obzirom na presjek A u zakovanom stanju, tj. prema promjeru rupe d_1, što je zakovica pri zakivanju gotovo sasvim ispuni.

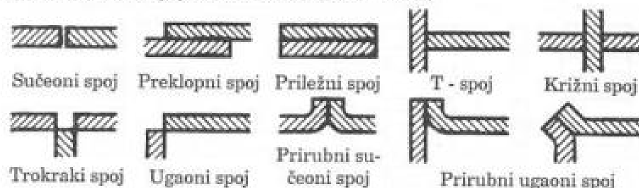
Sila F, koju može prenositi limena vrpca debljine s i širine, jednake razmaku t među zakovicama u redu, je

$$F = (t - d_1)s\,\sigma_{dop} = A\,\tau_{s\,dop} = d_1 s\,p_{dop}$$

gdje su: σ_{dop} dopušteno vlačno naprezanje zakovice, $\tau_{s dop}$ dopušteno smično naprezanje zakovice, p_{dop} dopušteni bočni tlak (između zakovice i lima).

Zavari

Oblici zavarenih spojeva (HRN C.T3.001 – 1971)



Vrste šavova i njihovi znakovi (HRN C.T3.011 – 1980)

Naziva šava	Presjek	Znak	Naziva šava	Presjek	Znak
I -šav		‖	Šav iz priruba		
V - šav		V			
Polovični V - šav			Kutni šav		
Y - šav		Y			
Polovični Y - šav			Koritasti šav		
U - šav					
Polovični U - šav			Točkasti šav		○
X - šav		X			
Korijenski zavar			Kolutni šav		

Dopunske oznake za oblik površine šava:

ravna: – ispupčena: ⌒ udubljena: ◡

Označivanje zavara na crtežima – strjelicom

V- šav s ravnim tjemenom		X - šav s ispupčenim tjemenom	
Kutni šav s udubljenim tjemenom		U - šav s ravnim korijenskim zavarom	

Označavanje zavara na crtežima – strjelicom

Prikaz	Označivanje	
		nad crtom strjelice, ako je tjeme zavara na strani strjelice
		pod crtom strjelice, ako je tjeme zavara na suprotnoj strani strjelice
		kroz crtu strjelice,ako je zavar na prekrivenim plohama spoja

Proračun zavarenih spojeva

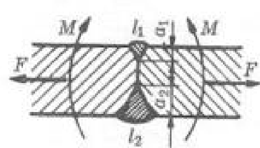
Naprezanja na vlak (tlak) σ zbog djelovanja sile F i naprezanje na savijanje σ_f zbog djelovanja momenta M iznose u temeljnim slučajevima zavarenih spojeva debljine zavara a i duljine l:

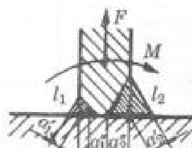




$$\sigma = \frac{F}{a\,l} \qquad \sigma_f = \frac{6\,M}{a^2\,l}$$

Naprezanja u dvostranim zavarima:





$$\sigma = \frac{F}{a_1\,l_1 + a_2\,l_2}$$
$$a_1 = a_1{'} + a_1{''}$$
$$a_2 = a_2{'} + a_2{''}$$
$$\sigma_f = \frac{M}{W}$$

gdje je W moment otpora zavara.

Dopuštena naprezanja u zavaru $\sigma_{dop\,zav}$ znatno su manja od normalnih dopuštenih naprezanja σ_{dop}: $\sigma_{dop\,zav} = \alpha\,\sigma_{dop}$.

Faktor zavarivanja α veoma ovisi o statičkom i dinamičkom opterećenju, vrsti zavarenog spoja i izvedbi zavara. Njegove su vrijednosti približno u sljedećim granicama:

		Vlak (tlak)	Savijanje	Smik
Statičko opterećenje:	sučeljeni spoj	0,7 ... 1,0	0,8 ... 1,0	0,65
	T-spoj	0,6 ... 0,7	0,6 ... 0,7	0,65
Dinamičko opterećenje:	sučeljeni spoj	0,5 ... 0,9	0,6 ... 0,9	0,6
	T-spoj – jednostrani	0,2 ... 0,6	0,1 ... 0,3	0,4
	– dvostrani	0,3 ... 0,7	0,6 ... 0,8	0,6

Pri običnoj izvedbi zavarenog spoja vrijednosti se mogu smanjiti i do 50 %.

Lemljeni spojevi

O lemovima v. str. 469 i 470.

Proračun lemljenih spojeva

Lemljene spojeve računamo uglavnom na smik, iznimno na vlak.

Sila F, koju prenosi lemljeni spoj opterećen na smik, iznosi

$$F = b\,l/\tau_s$$

gdje su: b širina spoja, l duljina spoja.

Naprezanje τ_s u spoju, opterećenom na smik, ne smije biti veće od dopuštenog naprezanja $\tau_{s\,dop}$

$$\tau_s \leq \tau_{s\,dop}\,.$$

Čvrstoća na smik je najveća pri debljini lemnog sloja 0,05 ... 0,2 mm.

Meki lemovi pri opterećenju puze; njihova čvrstoća s vremenom jako popušta (npr. meki lem S.Sn 40 ima kratkotrajnu čvrstoću na smik 35 N/mm^2, a nakon 10^5 h samo još 2 N/mm^2). Čvrstoća mekih lemova veoma ovisi o temperaturi (pa npr. pri 150 °C može iznositi još samo 15 % od vrijednosti pri 20 °C).

Čvrstoća lemljenih spojeva veoma ovisi također o dinamičkom opterećenju (npr. srebrni lem pri 10^4 titraja ima čvrstoću 210 N/mm^2, a pri 10^7 titraja samo još 170 N/mm^2).

Lijepljeni spojevi

Lijepljeni se spojevi rabe pri spajanju kovina i nekovina (drveta, umjetnih tvari, gume, stakla, porculana itd.). Za međusobno spajanje kovina dolazi u obzir lijepljenje naročito tamo gdje treba spriječiti gubitak svojstava postignutih termičkom obradbom (npr. kod termički obrađenog duraluminija ili kod vrlo tankih dijelova).

Kao ljepila se rabe tvari na temelju umjetnih smola (trgovačka imena: araldit, reduks, bostik, metalon itd.). Pri njihovoj uporabi treba se strogo pridržavati proizvođačevih uputa.

Čvrstoća lijepljenih spojeva posljedica je adhezije između ljepila i slijepljenog dijela (dok je značenje mehaničkog usidrenja mnogo manje). Deblji sloj ljepila ima manju čvrstoću (pri debljini 0,05 mm može iznositi npr. 38 N/mm^2, a pri debljini 1 mm još samo 15 N/mm^2).

Čvrstoća lijepljenog spoja veoma se smanjuje pri višim temperaturama (ako npr. između – 50 i + 80 °C iznosi oko 25 N/mm^2, pri + 150 °C može se smanjiti na samo 2 N/mm^2).

Nadalje, čvrstoća lijepljenog spoja veoma ovisi o broju titraja (pa se može između 10^3 i 10^8 titraja smanjiti za 80 %, a da pri 10^9 titraja još nije dosegnuta trajna dinamička čvrstoća).

Stezni spojevi

Stezne spojeve dobivamo navlačenjem obruča unutarnjeg promjera d_2 na rukavac većeg vanjskog promjera D_1, i to – obično – hlađenjem rukavca i zagrijavanjem obruča.

Relativna deformacija ε rukavca i obruča (s obzirom na prvobitni promjer rukavca) iznosi

$$\varepsilon = (D_1 - d_2)/D_1 = \Delta d/D_1.$$

Tlak p na plohi između rukavca i obruča u stegnutom stanju ovisi o dupuštenim naprezanjima u rukavcu $\sigma_{1\,\mathrm{dop}}$ i obruču $\sigma_{2\,\mathrm{dop}}$:

$$p \le \sigma_{1\,\mathrm{dop}}\,[1 - (d_1/D_1)^2]/2 \qquad p \le \sigma_{2\,\mathrm{dop}}\,[1 - (d_2/D_2)^2]/2$$

Po Hookeovu zakonu vrijedi za rukavac i obruč

$$\frac{\varepsilon}{p} = \frac{1}{E_1}\left[\frac{1 + (d_1/D_1)^2}{1 - (d_1/D_1)^2} - \frac{1}{\mu_1}\right] + \frac{1}{E_2}\left[\frac{1 + (d_2/D_2)^2}{1 - (d_2/D_2)^2} - \frac{1}{\mu_2}\right]$$

gdje su: E_1 i E_2 moduli elastičnosti za rukavac i obruč, μ_1 i μ_2 Poissonovi omjeri za rukavac i obruč.

Stezna deformacija

$$\Delta d = D_1\, p\, (\varepsilon/p).$$

Temperaturne razlike, potrebne pri navlačenju:

Hlađenje rukavca za temperaturnu razliku $T_0 - T_1$ uzrokuje suženje rukavca za Δd_1, dok zagrijavanje obruča za temperaturnu razliku $T_2 - T_0$ uzrokuje proširenje obruča za Δd_2:

$$\Delta d_1 = \alpha_{l1}\, D_1\, (T_0 - T_1) \qquad \Delta d_2 = \alpha_{l2}\, d_2\, (T_2 - T_0)$$

gdje su: T_0 temperatura okolice, T_1 temperatura ohlađenog rukavca, T_2 temperatura zagrijanog obruča, α_{l1} i α_{l2} koeficijenti toplinskog rastezanja rukavca i obruča (v. str. 187).

Ukupna promjena promjera mora biti veća od tražene stezne deformacije

$$\Delta d_1 + \Delta d_2 > \Delta d$$

Prijenosna sila F steznog spoja je

$$F = \mu D_1\, \pi\, l\, p$$

gdje je l duljina korisne prijenosne površine rukavca.

Faktor trenja μ na plohi između rukavca i obruča u stegnutom stanju iznosi 0,05 ... 0,19 (za srednje tvrdi čelik približno 0,16).

Prijenosni moment M_t steznog spoja je

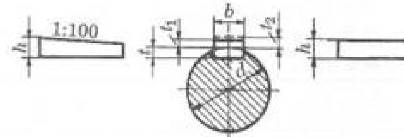
$$M_t = (d_2/2)\, F.$$

Klinasti spojevi

Razlikujemo klinove (s nagibom 1 : 100) i pera.

Klinovi *Pera*

d promjer osovine
b širina } klina odn. pera
h visina }
dubina utora:
t na osovini
t_1 na glavini za klinove
t_2 na glavini za pera



Temeljni normirani klinovi i pera prema HRN: *Klinovi* (HRN M.C2.020 – 1957). – *Plosnati klinovi* (HRN M.C2.021 – 1957). – *Pera, visoka* (HRN M.C2.060 – 1957). – *Pera, niska* (HRN M.C2.061 – 1957).

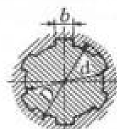
d / mm	b / mm	h / mm	HRN M.C2.020 t / mm	t_1 / mm	HRN M.C2.060 t / mm	t_2 / mm	h / mm	HRN M.C2.021 t / mm	t_1 / mm	HRN M.C2.061 t / mm	t_2 / mm
6) ... 8	2	2	1,1	0,6	1,1	1,0	–	–	–	–	–
8) ... 10	3	3	1,7	1,0	1,7	1,4	–	–	–	–	–
10) ... 12	4	4	2,4	1,3	2,4	1,7	–	–	–	–	–
12) ... 17	5	5	2,9	1,8	2,9	2,2	3	–	–	1,9	1,2
17) ... 22	6	6	3,5	2,1	3,5	2,6	4	–	–	2,5	1,6
22) ... 30	8	7	4,1	2,4	4,1	3,0	5	1,3	3,2	3,1	2,0
30) ... 38	10	8	4,7	2,8	4,7	3,4	6	1,8	3,7	3,7	2,4
38) ... 44	12	8	4,9	2,6	4,9	3,2	6	1,8	3,7	3,9	2,2
44) ... 50	14	9	5,5	2,9	5,5	3,6	6	1,4	4,0	4,0	2,1
50) ... 58	16	10	6,2	3,2	6,2	3,9	7	1,9	4,5	4,7	2,4
58) ... 65	18	11	6,8	3,5	6,8	4,3	7	1,9	4,5	4,8	2,3
65) ... 75	20	12	7,4	3,9	7,4	4,7	8	1,9	5,5	5,4	2,7
75) ... 85	22	14	8,5	4,8	8,5	5,6	9	1,8	6,5	6,0	3,1
85) ... 95	25	14	8,7	4,6	8,7	5,4	9	1,9	6,4	6,2	2,9
95) ... 110	28	16	9,9	5,4	9,9	6,2	10	2,4	6,9	6,9	3,2
110) ... 130	32	18	11,1	6,1	11,1	7,1	11	2,3	7,9	7,6	3,5
130) ... 150	36	20	12,3	6,9	12,3	7,9	12	2,8	8,4	8,3	3,8
150) ... 170	40	22	13,5	7,7	13,5	8,7	14	4,0	9,1	–	–
170) ... 200	45	25	15,3	8,9	15,3	9,9	16	4,7	10,4	–	–
200) ... 230	50	28	17,0	10,1	17,0	11,2	18	5,2	11,7	–	–
230) ... 260	56	32	19,3	11,8	19,3	12,9	–	–	–	–	–
260) ... 290	63	32	19,6	11,5	19,6	12,6	–	–	–	–	–
290) ... 330	70	36	22,0	13,1	22,0	14,2	–	–	–	–	–
330) ... 380	80	40	24,6	14,5	24,6	15,6	–	–	–	–	–
380) ... 440	90	45	27,5	16,6	27,5	17,7	–	–	–	–	–
440) ... 500	100	50	30,4	18,7	30,4	19,8	–	–	–	–	–

Za klinove i pera rabimo čelik čvrstoće $R_m \ge$ 600 N/mm².

Utorni spojevi

Utorni spojevi s ravnim bokovima (HRN M.C1.410 – 1958)

Unutarnji promjer d
Vanjski promjer D
– za laku izvedbu D_1
– za srednju izvedbu D_2
Širina utora b
Broj utora n



d mm	D_1 mm	D_2 mm	b mm	n	d mm	D_1 mm	D_2 mm	b mm	n
11	–	14	3	6	42	46	48	8	8
13	–	16	3,5	6	46	50	54	9	8
16	–	20	4	6	52	58	60	10	8
18	–	22	5	6	56	62	65	10	8
21	–	25	5	6	62	68	72	12	8
23	26	28	6	6	72	78	82	12	10
26	30	32	6	6	82	88	92	12	10
28	32	34	7	6	92	98	102	14	10
32	36	38	6	8	102	108	112	16	10
36	40	42	7	8	112	120	125	18	10

Spojevi sa svornjacima i zaticima

Svornjaci

Normirani promjeri d

3 4 5 6 8 10 12 14 16 18 20 22 25 28 30

32 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100

Obrađeni svornjaci | bez glave (HRN M.C3.040 – 1954) d = 3 ... 100 mm
| s malom glavom (HRN M.C3.020 – 1954) d = 3 ... 100 mm

Poluobrađeni svornjaci | s velikom glavom (HRN M.C3.021 – 1954) d = 6 ... 100 mm
| s malom glavom (HRN M.C3.022 – 1954) d = 5 ... 100 mm

Zatici

Normirani promjeri d

0,6 0,8 1 1,5 2 2,5 3 4 5 6 8 10 13 16 20 25 30 40 50

Cilindrični zatici

– u tolerancijskom polju h 8 (HRN M.C2.201 – 1952) d = 0,8 ... 50 mm
– u tolerancijskom polju h 11 (HRN M.C2.202 – 1952) d = 0,8 ... 50 mm
– u tolerancijskom polju m 6 (HRN M.C2.203 – 1952) d = 1 ... 50 mm

Zakaljeni cilindrični zatici (60 HRC)

– u tolerancijskom polju m 6 (HRN M.C2.204 – 1952) d = 0,8 ... 20 mm

Stožasti zatici (1 : 50) (promjer d mjeri se na užem kraju) (HRN M.C2.205 – 1952) d = 0,6 ... 50 mm

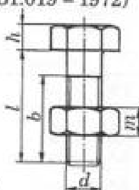
Vijčani spojevi

Normiranih vijaka i matica ima mnogo. Najobičniji su vijci sa šesterokutnom glavom i maticom (ISO).

Nazivne duljine tijela vijka i duljine navoja (HRN M.B1.019 – 1972)

Duljine tijela l (mm):

2	(7)	14	(28)	45	75	(105)	140	200
2,5	8	16	30	50	80	110	150	220
3	(9)	(18)	(32)	55	85	(115)	160	240
4	10	20	35	60	90	120	170	260
5	(11)	(22)	(38)	65	(95)	(125)	180	280
6	12	25	40	70	100	130	190	300



Treba se kloniti duljina u zagradama!

Duljine navoja b: za $l \leq 125$ mm $b = 2d + 6$ mm
za l = 125) ... 200 mm $b = 2d + 12$ mm
za $l > 200$ mm $b = 2d + 25$ mm

Ako je $l \leq b$, navoj se izvodi do glave vijka.

Vijci sa šesterokutnom glavom – izradbe C i B (HRN M.B1.060/051 – 1976)
Šesterokutne matice za opće svrhe (HRN M.B1.600 – 1965)
Tvar: čelik ili mjed – bez propisanih mehaničkih svojstava.

Nazivni promjer d mm	Normalne duljine tijela l mm	Duljina navoja vijka[1] b l_1 mm	l_2 mm	l_3 mm	Glave vijka i matice h mm	m mm	s mm	e mm
M 5	20 ... 50	16	–	–	3,5	4	8	8,63
M 6	25 ... 80	18	–	–	4	5	10	10,89
M 8	30 ... 100	22	–	–	5,5	6,5	13	14,20
M 10	35 ... 200	26	32	–	7	8	17	18,72
M 12	40 ... 220	30	36	–	8	10	19	20,88
(M 14)	45 ... 220	34	40	–	9	11	22	23,91
M 16	50 ... 220	38	44	57	10	13	24	26,17
(M 18)	55 ... 220	42	48	61	12	15	27	29,56
M 20	60 ... 220	46	52	65	13	16	30	32,95
(M 22)	60 ... 220	50	56	69	14	18	32	35,03
M 24	60 ... 220	54	60	73	15	19	36	39,55
(M 27)	70 ... 220	60	66	79	17	22	41	45,20
M 30	80 ... 220	66	72	85	19	24	46	50,85
(M 33)	100 ... 220	72	78	91	21	26	50	55,37
M 36	100 ... 220	78	84	97	23	29	55	60,79
(M 39)	100 ... 220	84	90	103	25	31	60	66,44
M 42	120 ... 220	90	96	109	26	34	65	72,09
(M 45)	140 ... 220	–	102	115	28	36	70	77,74
M 48	150 ... 220	–	108	121	30	38	75	83,39
(M 52)	180 ... 220	–	116	129	33	42	80	89,04

Vijci sa šesterokutnom glavom – izradbe *A*: HRN M.B1.052 – 1976, *s navojem do glave*: HRN M.B1.053/055 – 1976, *s finim navojem*: HRN M.B1.057/060 – 1976.

[1] Prema HRN M.B1.019 – 1972: $l_1 \leq 125$ mm, l_2 = 125) ... 200 mm, $l_3 > 200$ mm.

Kvalitetni vijci i matice (HRN M.B1.023 – 1983 i 028 – 1975)

Vijci							Matice		
Razred čvrstoće	Naprezanje tečenja R_e N/mm²	$R_{p\,0,2}$ N/mm²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm²	Produljenje A_5 %	Tvrdoća		Razred čvrstoće	Čvrstoća R_m N/mm²	Tvrdoća HV
4.6	240		400 ... 550	25	110 ... 170 HB		**4** [3]	400	302
4.8 [1]	320			14					
5.6	300		500 ... 700	20	140 ... 215 HB		**5** [3]	500	302
5.8 [1]	400			10					
6.6	360		600 ... 800	16	170 ... 245 HB		**6** [3]	600	302
6.8 [1]	480			8					
6.9		540		12					
8.8		640	800 ... 1000	12	225 ... 300 HV		8	800	302
10.9		900	1000 ... 1200	9	280 ... 370 HV		**10**	1 000	353
12.9 [2]		1 080	1200 ... 1400	8	330 ... 440 HV		**12** [4]	1 200	353
14.9		1 260	1400 ... 1600	7	400 ... 510 HV		**14**	1 400	380

Preporučeni promjeri svrdla za rupe pred narezivanjem navoja
(HRN M.B1.003 – 1972)

Oznaka navoja	Promjer svrdla d_s mm	Oznaka navoja	Promjer svrdla d_s mm	Oznaka navoja	Promjer svrdla d_s mm	Oznaka navoja	Promjer svrdla d_s mm
M 1	0,75	M 3,5	2,9	M 12	10,2	M 36	32
M 1,1	0,85	M 4	3,3	M 14	12	M 39	35
M 1,2	0,95	M 4,5	3,7	M 16	14	M 42	37,5
M 1,4	1,1	M 5	4,2	M 18	15,5	M 45	40,5
M 1,6	1,25	M 6	5	M 20	17,5	M 48	43
M 1,8	1,45	M 7	6	M 22	19,5	M 52	47
M 2	1,6	M 8	6,8	M 24	21	M 56	50,5
M 2,2	1,75	M 9	7,8	M 27	24		
M 2,5	2,05	M 10	8,5	M 30	26,5		
M 3	2,5	M 11	9,5	M 33	29,5		

[1] Nelegirani čelici (P ≤ 0,06 %, S ≤ 0,07 %) i čelici za automate (P ≤ 12 %, S ≤ 0,34 %, PB ≤ 0,35 %).

[2] Poboljšani čelici, nelegirani (C = 0,32 ... 0,5 %) i legirani (C = 0,19 ... 0,52 %):
Razred čvrstoće: 8.8 10.9 12.9 14.9
Cr + Mo + Ni + V ≥ 0 ... 0,5 0 ... 0,9 0,9 ... 1,5 1,5 ... 2,5.

[3] Nelegirani čelici (C ≤ 0,5 %, P ≤ 0,110 %, S ≤ 0,150 %).

[4] Mn – čelici (C ≤ 0,58 %, Mn ≤ 0,30...0,45 %).

Promjeri provrta za vijke s matičnim navojem (HRN M.B1.004 – 1986)

Oznaka navoja	Promjer provrta [1] d mm f	s	g	Oznaka navoja	Promjer provrta [1] d mm f	s	g	Oznaka navoja	Promjer provrta [1] d mm f	s	g
M 1	1,1	1,2	1,3	M 14	15	15,5	16,5	M 64	66	70	74
M 1,2	1,3	1,4	1,5	M 16	17	17,5	18,5	M 68	70	74	78
M 1,4	1,5	1,6	1,8	M 18	19	20	21	M 72	74	78	82
M 1,6	1,7	1,8	2	M 20	21	22	24	M 76	78	82	86
M 1,8	2,0	2,1	2,2	M 22	23	24	26	M 80	82	86	91
M 2	2,2	2,4	2,6	M 24	25	26	28	M 85	87	91	96
M 2,5	2,7	2,9	3,1	M 27	28	30	32	M 90	93	96	101
M 3	3,2	3,4	2,6	M 30	31	33	35	M 95	98	101	107
M 3,5	3,7	3,9	4,2	M 33	34	36	38	M 100	104	107	112
M 4	4,3	4,5	4,8	M 36	37	39	42	M 105	109	112	117
M 4,5	4,8	5	5,3	M 39	40	42	45	M 110	114	117	122
M 5	5,3	5,5	5,8	M 42	43	45	48	M 115	119	122	127
M 6	6,4	6,6	7	M 35	46	48	52	M 120	124	127	132
M 7	7,4	7,6	8	M 48	50	52	56	M 125	129	132	137
M 8	8,4	9	10	M 52	54	56	62	M 130	134	137	144
M 10	10,5	11	12	M 56	58	62	66	M 140	144	147	155
M 12	13	13,5	14,5	M 60	62	66	70	M 150	155	158	165

Proračun vijaka

a) *Vijci za pričvršćivanje*

Maksimalna sila F_{max}, koje može prenositi vijak presjeka A (s promjerom jezgre navoja d_1), iznosi

$$F_{max} \le A\,\sigma_{dop} \qquad A = d_1^2\,\pi/4\,.$$

Dopušteno naprezanje σ_{dop} za vijke određujemo obično ovisno o naprezanju tečenja R_e ($R_{p\,0,2}$)

$$\sigma_{dop} \approx 0{,}3\,R_e.$$

Za prednapregnute vijke uzimamo F_{max} = (1,3 ... 1,6) F, gdje je F vanjska sila, kojom opterećujemo vijak na vlak.

b) *Vijci za prijenos gibanja* (obično s trapeznim ili pilastim navoje)

Nosiva sila F određuje se – osim proračunom čvrstoće (kao pod a) – još i s obzirom na bočni tlak p dodirnih ploha u navoju

$$F_{max} \le \frac{(d^2 - d_1^2)\,\pi}{4}\,p\,n$$

gdje su: d vanjski promjer vijka; n broj nosivih navoja.

Bočni tlak p kod brončanih matica iznosi:

za vijke od mekog čelika $p \le 7{,}5$ N/mm²

za vijke od tvrdog čelika $p \le 16$ N/mm²

[1] f – fina izradba (za finu mehaniku, precizne strojeve i alat); s – osrednja izradba (za opće strojarstvo); g – gruba izradba (za grube dijelove, lijevane rupe).

Vratila

Okrugla vratila promjera d mogu prenositi moment vrtnje T

$$T = W_p \tau_{t\,dop}$$

gdje je W_p polarni moment otpora okruglog vratila

$$W_p = (\pi/16)\, d^3 \approx 0{,}2\, d^3$$

a $\tau_{t\,dop}$ je dopušteno naprezanje na torziju.

Za vratila uzimamo čelik čvrstoće $R_m = 420 \ldots 700$ N/mm². Ako dodatni momenti savijanja nisu poznati, računamo s dopuštenim naprezanjem uslijed opterećenja na torziju $\tau_{t\,dop}$ ovisno o promjeru vratila d

d/mm	...25	25...50	50...80	80...
$\tau_{t\,dop}$/(N/mm²)	10	20	30	40

Ako su, međutim, momenti savijanja poznati, treba vratilo računati pomoću sastavljenih opterećenja (v. str. 150).

Za prijenos momenta vrtnje T promjer vratila d treba biti

$$d = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi} \cdot \frac{T}{\tau_{dop}}} \approx \sqrt[3]{\frac{5\,T}{\tau_{dop}}}\,.$$

Moment vrtnje možemo izraziti snagom P, koju vratilo prenosi, i brzinom vrtnje vratila n

$$T = \frac{P}{2\,\pi\,n}\,.$$

Remenski prijenos

Zbog trenja između remena i remenice sila F_1 u vučnoj strani remena veća je od sile F_2 u povratnoj strani

$$F_1 > F_2 \qquad \frac{F_1 - F_c}{F_2 - F_c} = e^{\mu\hat{\alpha}} \qquad F_c = \varrho_l\, v^2 = \varrho\, A\, v^2$$

gdje su: e baza prirodnih logaritama, μ faktor trenja, α obuhvatni kut (rad) remena na remenici, F_c sila u remenu zbog centrifugalne sile, ϱ_l duljinska gustoća remena (kg/m), ϱ gustoća remena, A presjek remena, v brzina remena.

Vrijednosti izraza $e^{\mu\hat{\alpha}}$

μ	α 120°	140°	160°	180°	200°	220°
0,2	1,52	1,63	1,75	1,88	2,01	2,16
0,4	2,31	2,66	3,06	3,51	4,04	4,65
0,6	3,51	4,33	5,34	6,59	8,12	10,0
0,8	5,34	7,06	9,34	12,4	16,3	21,6

Obodna sila F

$$F = F_1 - F_2 = (F_1 - F_c)(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1)/e^{\mu\hat{\alpha}} = (F_2 - F_c)(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1)$$

Snaga P, koju remen prenosi pri obodnoj brzini $v = d\,\pi\,n$

$$P = F\,v = (F_1 - F_2)\,d\,\pi\,n$$

Sila F_1, kojom je remen napregnut (u vučnom dijelu):

$$F_1 = (F_1 - F_2)\,e^{\mu\hat{\alpha}}/(e^{\mu\hat{\alpha}} - 1) + F_c = A\,\sigma_{dop}$$

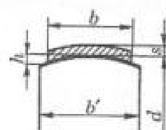
gdje su: A presjek remena, σ_{dop} dopušteno naprezanje remena.

Prijenosni omjer i je omjer brzine vrtnje n_1 pogonske remenice i brzine vrtnje n_2 gonjene remenice: $i = n_1/n_2$.

a) *Plosnati remeni* izrađuju se od kože, gume, tekstila, umjetnih tvari itd.

Širine remena i remenica (HRN M.C1.231 – 1965)

b/mm	b'/mm	b/mm	b'/mm	b/mm	b'/mm	b/mm	b'/mm	b/mm	b'/mm
16	20	50	63	100	112	180	200	315	355
20	25	63	71	112	125	200	224	355	400
25	32	71	80	125	140	224	250	400	450
32	40	80	90	140	160	250	280	450	500
40	50	90	100	160	180	280	315	500	560
									630



Promjeri remenica d (mm) (HRN M.C1.241 – 1965)

40	56	80	112	160	224	315	450	630	900	1250	1800
45	63	90	125	180	250	355	500	710	1000	1400	2000
50	71	100	140	200	280	400	560	800	1120	1600	

Izbočenost vijenca remenice h (HRN M.C1.242 – 1965)

d/mm	h/mm	d/mm	h/mm	d/mm	h/mm
40 ... 112	0,3	160, 180	0,5	250, 280	0,8
125, 140	0,4	200, 224	0,6	315, 355	1,0

Izbočenost za $d = 400 \ldots 2000$ mm iznosi između 1 i 6 mm (ovisi o širini remenice b').

Reducirana snaga P/A, tj. prijenosna snaga remena P po jedinici presjeka A, ovisi o tvari remena, obuhvatnom kutu α, relativnoj debljini s/d (s = debljina remena, d = promjer remenice) i o obodnoj brzini v.

Snaga reducirana na ploštinu presjeka remena P/A za plosnati kožni remen pri obuhvatnom kutu $\alpha = 180°$

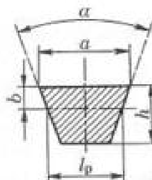
s/d	v/(m/s) — P/A / (kW/mm²) 5	10	15	20	25	30	35	40
1:400	0,013	0,025	0,036	0,047	0,056	0,063	0,065	0,063
1:200	0,012	0,023	0,034	0,045	0,053	0,060	0,062	0,059
1:100	0,011	0,021	0,032	0,042	0,049	0,055	0,057	0,053
1:50	0,010	0,019	0,029	0,037	0,043	0,047	0,048	0,042

Prijenosni je omjer kod plosnatih remena: $i \le 5$.

b) *Beskonačni klinasti remeni.* Profil klinastih remena je trapez širine (dulje) osnovice a visine h, dok bočne stranice zatvaraju kut od 40°.

Normalni klinasti remeni (HRN G.E2.053 – 1964)

Oznaka profila	a/mm	h/mm	b/mm	l_p/mm	L_p/mm
Y	6	4	1,6	5,3	200 ... 1 250
Z	10	6	2,4	8,5	400 ... 2 800
A	13	8	3,1	11	560 ... 4 000
B	17	11	4,1	14	800 ... 6 300
C	22	14	5,6	19	1 400 ... 9 000
D	32	19	8,2	27	22 400 ... 18 000
E	38	25	9,7	32	3 150 ... 18 000



Uski klinasti remeni

Oznaka profila	a/mm	h/mm	b/mm	l_p/mm	L_p/mm
SPZ	9,7	8	2	8,5	630 ... 3 550
SPA	12,7	10	2,75	11	800 ... 4 500
SPB	16,3	13	3,5	14	1 250 ... 8 000
SPC	22	18	4,8	19	2 000 ... 12 500

Računske duljine L_p/mm (HRN G.E2.053 – 1964)

200	355	630	1 120	2 000	3 550	6 300	11 200
224	400	710	1 250	2 240	4 000	7 100	12 500
250	450	800	1 400	2 500	4 500	8 000	14 000
280	500	900	1 600	2 800	5 000	9 000	16 000
315	560	1 000	1 800	3 150	5 600	10 000	18 000

Snaga P, što je prenosi klinasti remen, ovisi o obuhvatnom kutu α, o najmanjem promjeru remenice d_{min} i o obodnoj brzini v.

Snaga P **klinastog remena pri obuhvtnom kutu** $\alpha = 180°$

Oznaka profila	d_{min}/min	v/(m/s) P / kW: 2	4	6	10	14	18	22	26
Y	32	0,037	0,074	0,11	0,16	0,19	0,19	0,15	0,058
Z	63	0,14	0,27	0,41	0,64	0,81	0,88	0,88	0,74
A	90	0,27	0,55	0,81	1,25	1,6	1,9	2,0	1,9
B	125	0,51	0,96	1,4	2,3	2,9	3,4	3,5	3,3
C	210	0,89	1,75	2,6	4,1	5,3	6,1	6,4	5,9
D	345	1,7	3,3	4,8	7,7	10,0	11,5	12,1	11,2
E	490	2,6	5,2	7,7	11,9	15,4	18,1	18,9	17,5

Pri manjem obuhvatnom kutu α valja vrijednosti za snagu P množiti s faktorom k

α	170°	160°	150°	140°	130°	120°	110°	100°	90°
k	0,58	0,95	0,92	0,89	0,86	0,82	0,78	0,73	0,68

Prijenosni je omjer kod klinastih remena $i \leq 10$ (... 15).

Lančani prijenos

Obodna sila F_0 proizlazi iz snage što je prenosi lanac pri brzini v, odnosno iz momenta vrtnje T lančanika (lančanog zupčanika) i promjera njegove diobene kružnice d_0

$$F_0 = \frac{P}{v} = \frac{2\,T}{d_0}$$

pri čemu brzina lanca, koja je jednaka obodnoj brzini na diobenom valjku, ovisi o brzini vrtnje n

$$v = d_0 \pi n.$$

U lancu djeluje još i komponenta centrifugalne sile

$$F_c = \varrho_l v^2$$

gdje je ϱ_l duljinska gustoća lanca (kg/m).

Ukupna sila, kojom je opterećen lanac, iznosi

$$F = F_0 + F_c.$$

Bočni tlak p na dodirne plohe članaka A

$$p = \frac{F}{A} < p_{dop}.$$

Dopušteni bočni tlak p_{dop} ovisi o brzini lanca v i pri uobičajenim pogonskim je prilikama:

v/(m/s)	0,1	0,5	1,0	1,5	2	3	4	5,5	7	9	12
p/(N/mm^2)	3100	2800	2600	2400	2250	2050	1850	1600	1400	1250	1000

Lančanici

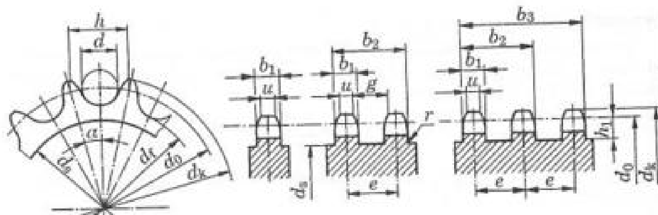
Promjer diobenog valjka d_0

$$d_0 = \frac{h}{\sin \alpha} = h\,N \qquad \alpha = \frac{180°}{z}$$

gdje su: h korak lanca; α (°) polovični kut među susjednim zupcima; z broj zubaca lančanika.

Vrijednosti N

z	N	z	N	z	N	z	N	z	N
6	2,000 0	16	5,125 8	26	8,296 2	36	11,473 7	46	14,653 7
7	2,304 8	17	5,442 2	27	8,613 8	37	11,791 6	47	14,971 7
8	2,613 1	18	5,758 8	28	8,931 4	38	12,109 6	48	15,289 8
9	2,923 8	19	6,075 5	29	9,249 1	39	12,427 5	49	15,607 9
10	3,236 1	20	6,392 5	30	9,566 8	40	12,745 5	50	15,926 0
11	3,549 5	21	6,709 5	31	9,884 5	41	13,063 5	51	16,244 1
12	3,863 7	22	7,026 7	32	10,202 3	42	13,381 5	52	16,562 2
13	4,178 6	23	7,343 9	33	10,520 1	43	13,699 5	53	16,880 3
14	4,494 0	24	7,661 3	34	10,838 0	44	14,017 6	54	17,198 4
15	4,809 7	25	7,978 7	35	11,155 8	45	14,335 6	55	17,516 6



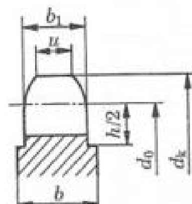
Tjemeni valjak

$z = 7 \ldots 12$	$d_k = d_0 + (0{,}5 \ldots 0{,}6)\, d$
$z = 13 \ldots 25$	$d_k = d_0 + (0{,}6 \ldots 0{,}7)\, d$
$z \leq 26$	$d_k = d_0 + (0{,}7 \ldots 0{,}8)\, d$

Lančanici za članksaste lance s valjcima

Lanac		Lančanik				
h / mm	e / mm	b_1 / mm	b_2 / mm	b_3 / mm	u / mm	h_1 min / mm
6	5,5	2,5	8	–	1,3	3,5
8	5,64	2,7	8,3	–	1,5	5
12,7	–	3	–	–	2	8
12,7	–	4,4	–	–	3	8
25,4	31,88	15,4	47	79	11	17
25,4	31,4	15,4	53	90,2	11	17
31,75	36,45	18	54,5	91	13	19
38,1	48,36	23	71,4	120	16	25
44,45	59,56	28	87,6	147	20	28
50,8	58,55	28	86,6	145	20	31
63,5	72,29	34	106	178	24	41
76,2	91,21	41	132	233	29	48

Lančanici za članksaste lance s tuljcima i svornjacima



Tjemeni valjak lančanika:

– za lance s tuljcima

$$d_k = d_0 + (0{,}8 \ldots 1)\, d$$

– za lance sa svornjacima

$$d_k = d_0 + (3 \ldots 4 \text{ mm})$$

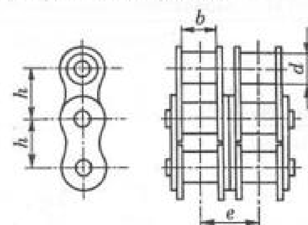
*

$b_1 \approx 0{,}9\, b$ $\qquad$ $u \approx 0{,}6\, b$

b je nosiva širina lanca (v. str. 624 i 625)

Člankasti lanci su lanci s valjcima, tuljcima i svornjacima.

h	korak
b	nosiva širina članka
d	nosivi promjer članka
e	razmak među člancima



Člankasti lanci s valjcima (HRN M.C1.820 – 1960), jedno-, dvo-, i troredni

				Prekidna sila			Duljinska gustoća		
				jednoredni	dvoredni	troredni	jednoredni	dvoredni	troredni
h / mm	b_{min} / mm	d / mm	e / mm	F / kN	F / kN	F / kN	ϱ_l / kg/m	ϱ_l / kg/m	ϱ_l / kg/m
6	2,8	4	–	3	–	–	0,12	–	–
8	3	5	5,64	5	9	–	0,18	0,36	–
12,7	3,3	7,75	–	8	–	–	0,40	–	–
12,7	4,88	7,75	–	8	–	–	0,44	–	–
25,4	17,02	15,88	31,88	45	80	115	2,7	5,4	8
(30)	17,02	15,88	–	45	–	–	2,5	–	–
31,75	19,56	19,05	36,45	55	100	140	3,6	7,2	11
38,1	25,4	25,4	48,36	120	215	300	6,7	13,5	21
44,45	30,99	27,94	59,56	140	250	360	8,3	16,6	25
50,8	30,99	29,21	58,55	180	320	450	10,5	21	32
63,5	38,1	39,37	72,29	270	480	680	16	32	48
76,2	45,75	48,26	91,21	400	700	1000	25	50	75

Člankasti lanci s valjcima:

– za povećano opterećenje (HRN M.C1.821 – 1960)
– s dugim člancima (HRN M.C1.822 – 1960)
– za poljoprivredne strojeve (HRN M.C1.827 – 1967).

Člankasti lanci s tuljcima (HRN M.C1.830 – 1960) – jednoredni

			Prekidna sila	Duljinska gustoća				Prekidna sila	Duljinska gustoća
h / mm	b / mm	d / mm	F / kN	ϱ_l / kg/m	h / mm	b / mm	d / mm	F / kN	ϱ_l / kg/m
15	14	9	12,5	1,20	55	45	30	125	13,6
20	16	12	25	2,15	60	50	32	160	14,9
25	18	15	31,5	2,55	65	55	36	200	18,9
30	20	17	40	4,00	70	65	42	250	24,7
35	22	18	50	4,30	80	70	44	315	31,0
40	25	20	63	5,50	90	80	50	400	41,8
45	30	22	80	7,55	100	90	56	500	48,4
50	35	26	100	9,04					

Članskasti (Gallovi) lanci sa svornjacima
(HRN M.C1.840/841-1960) - jednoredni

$\frac{h}{\text{mm}}$	$\frac{b}{\text{mm}}$	$\frac{d}{\text{mm}}$	Prekidna sila $\frac{F}{\text{kN}}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{\text{kg/m}}$	$\frac{h}{\text{mm}}$	$\frac{b}{\text{mm}}$	$\frac{d}{\text{mm}}$	Prekidna sila $\frac{F}{\text{kN}}$	Duljinska gustoća $\frac{\varrho_l}{\text{kg/m}}$
Laki lanci									
20	8	7	2,5	0,26	50	20	11	40	2,76
25	12	5	5	0,35	60	22	12	60	3,14
35	15	8	12,5	0,69	70	25	14	80	3,31
40	18	10	25	1,25	80	30	17	100	4,50
Teški lanci									
3,5	2	2	0,75	0,07	45	30	17	100	6,4
6	4	3	1,25	0,16	50	35	22	150	10,6
8	6	3,5	1,5	0,25	55	40	24	200	15,5
10	8	4	2,5	0,40	60	45	26	250	18,0
15	12	5	5	0,70	70	50	32	375	33,5
20	15	8	12,5	1,10	80	60	36	500	38,2
25	18	10	25	1,75	90	70	40	750	53,0
30	20	11	40	3,4	100	80	45	1 000	76,6
35	22	12	60	4,5	110	90	50	1 250	90,0
40	25	14	80	4,7	120	100	55	1 500	112

Broj članaka lanca x

$$x = 2\frac{a}{h} + \frac{z_1 + z_2}{2} + \frac{h}{a}\left(\frac{z_2 - z_1}{2}\right)^2$$

gdje su: a razmak osi; h korak lanca; z_1 broj zubaca malog lančanika; z_2 broj zubaca velikog lančanika.

Zupčani prijenos

Prijenosni omjer i[1] je omjer brzine vrtnje pogonskog zupčanika n_1 i gonjenog zupčanika n_2, odnosno broja zubaca gonjenog zupčanika z_2 i malog pogonskog z_1

$$i = n_1/n_2 = -z_2/z_1$$

$i > 1$ – prijenos na manju brzinu; $i < 1$ – prijenos na veću brzinu

Zubni omjer u je omjer broja zubi velikog zupčanika z_2[2] i malog zupčanika z_1:

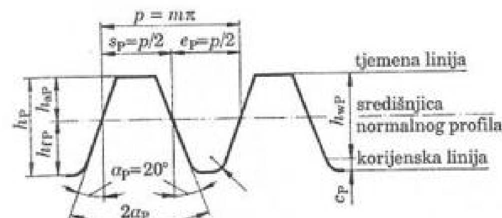
$$u = z_2/z_1$$

prema tome je: $u > 1$.

[1] Negativni predznak: smjerovi vrtnje su različiti (vanjsko ozubljenje), pozitivni predznak: smjerovi vrtnje su isti (unutarnje ozubljenje).

[2] Broj zubaca zupčanika s unutarnjim ozubljenjem ima predznak –.

Normalni profil evolventnih zupčanika (HRN M.C1.016 – 1958) – s novijim oznakama po ISO (DIN 876) osim oznaka po HRN:



Normalni profil koji treba rabiti pri projektiranju i izradbi evolventnih čelnika (cilindričnih zupčanika)



Korekcija profila koja se, prema potrebi, izvodi samo na glavi zupca

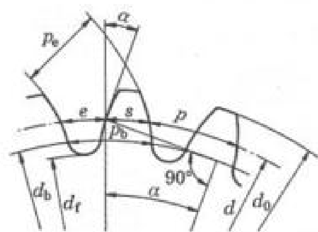
Veličina	Oznaka ISO	Oznaka HRN
normalni modul	$m = d/z$	m_n
korak	$p = m\pi$	t_n
visina zubnog vrha	$h_{aP} = m$	h_k
visina zubnog korijena	$h_{fP} = m + c_P$	h_f
visina ravnoga dijela	$h_{wP} = 2m$	h_n
visina zaokruženja	$c_P = 0{,}17\,m;\ 0{,}25\,m;\ 0{,}3\,m$	$c_n m_n$
polumjer zaokruženja	$\varrho_{fP} = 0{,}25\,m;\ 0{,}38\,m;\ 0{,}45\,m$	ϱ_n
visina zuba	$h_P = 2m + c_P$	h
nagibni kut	$\alpha_P = 20°$	α_n
bočni kut	$2\alpha_P$	–

Normalni moduli m (mm) po ISO (HRN M.C1.015 – 1965):

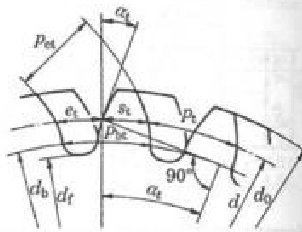
1	1,375	**2**	2,75	3,5	4,5	**6**	**8**	11	**16**	22	**32**	45
1,125	**1,5**	2,25	**3**	(3,75)	**5**	(6,5)	9	**12**	18	**25**	36	**50**
1,25	1,75	**2,5**	(3,25)	**4**	5,5	7	**10**	14	**20**	28	**40**	

Ponajprije valja rabiti debelo tiskane vrijednosti modula (1. prednost), tanko tiskane u slučaju opravdanih razloga (2. prednost), a vrijednosti u zagradama samo iznimno (3. prednost).

Čelnički parovi (cilindričnih zupčanika)
(HRN M.C1.012 – 1958) (s oznakama po ISO)



ravno ozubljenje



koso ozubljenje pod kutom β

Veličine čelničkih parova	ravno ozubljenje	koso ozubljenje
Modul	$m = m_n$ [1]	$m_t = m_n/\cos\beta$
Zahvatni kut	$\alpha = (\alpha_P = 20°) = \alpha_n$	$\alpha_t = \text{arc tan}(\tan\alpha_n/\cos\beta)$
Diobeni cilindar		
– promjer	$d = mz$	$d = m_t z = m_n z/\cos\beta$
– korak	$p = m\pi$	$p_t = m_t\pi = m_n\pi/\cos\beta$
– temeljni korak	$p_b = p\cos\alpha$	$p_{bt} = p_t\cos\alpha_t$
– korak među evolventnim bokovima	$p_e = p\cos\alpha = p_b$	$p_{et} = p_t\cos\alpha_t = p_{bt}$
Debljina zuba		
– pri vanjskom ozubljenju	$s = p/2 + 2\,xm\tan\alpha$	$s_t = p_t/2 + 2\,xm_t\tan\alpha_t$
– pri unutarnjem ozubljenju	$s = p/2 - 2xm\tan\alpha$	$s_t = p_t/2 - 2\,xm_t\tan\alpha_t$
Širina međuzublja	$e = p - s$	$e_t = p_t - s_t$
Promjeri korijenskih cilindara		
– pri vanjskom ozubljenju		
za pogonski zupčanik	$d_{f1} = d_1 - 2(h_{fP} - x_1 m)$	$d_{f1} = d_1 - 2(h_{fP} - x_{t1} m_t)$
za gonjeni zupčanik	$d_{f2} = d_2 - 2(h_{fP} - x_2 m)$	$d_{f2} = d_2 - 2(h_{fP} - x_{t2} m_t)$
– pri unutarnjem ozubljenju		
za pogonski zupčanik	$d_{f1} = d_1 - 2(h_{fP} - x_1 m)$	$d_{f1} = d_1 - 2(h_{fP} - x_{t1} m_t)$
za gonjeni zupčanik	$d_{f2} = d_2 + 2(h_{fP} + x_2 m)$	$d_{f2} = d_2 + 2(h_{fP} + x_{t2} m_t)$
Promjeri temeljnih cilindara	$d_b = d\cos\alpha$	$d_b = d\cos\alpha_t$

[1] m_n – normalni modul (modul u normalnoj ravnini presjeka).

Veličine čelničkih parova	ravno ozubljenje	koso ozubljenje
Promjeri tjemenskih cilindara		
– pri vanjskom ozubljenju		
za pogonski zupčanik	$d_{a1} = 2(a - 0{,}5\,d_{f2} - c_2)$	a = razmak osi
za gonjeni zupčanik	$d_{a2} = 2(a - 0{,}5\,d_{f1} - c_1)$	
– pri unutarnjem ozubljenju		
za pogonski zupčanik	$d_{a1} = d_{f2} - 2(a + c_2)$	
za gonjeni zupčanik	$d_{a2} = d_{f1} - 2(a + c_1)$	
Promjeri kinematičkih cilindara		
– pri vanjskom ozubljenju		
za pogonski zupčanik	$d_{w1} = 2a/(i+1)$	
za gonjeni zupčanik	$d_{w2} = 2ai/(i+1) = id_{w1}$	
– pri unutarnjem ozubljenju		
za pogonski zupčanik	$d_{w1} = 2a/(i-1)$	
za gonjeni zupčanik	$d_{w2} = 2ai/(i-1) = id_{w1}$	

Pomak profila temeljne ozubnice predočuje se umnoškom faktora pomaka profila temeljne ozubnice x (koji je ovisan o broju zuba i upadnog kuta α) i modula:

– ravno ozubljenje $\quad x\,m \quad (x_{min} = 1 - 0{,}5\,z\sin^2\alpha)$

– koso ozubljenje $\quad x_t m_t = x_n m_n \quad (x_{t\,min} = 1 - 0{,}5\,z\sin^2\alpha_t)$

Pomakom profila temeljne ozubnice povećava se nosivost, sprječava podrezivanje pri malom broju zubaca ($z < 17$), a smanjuje relativna brzina klizanja.

Jednadžbe vrijede za vanjsko i unutarnje ozubljenje; kod posljednje treba paziti na predznake zbog negativnog predznaka broja zubi zupčanika s unutarnjim ozubljenjem.

Osni razmak

– ravno ozubljenje
$$a = m\,\frac{z_1 + z_2}{2}\cdot\frac{\cos\alpha}{\cos\alpha_w}$$

– koso ozubljenje
$$a = m_t\,\frac{z_1 + z_2}{2}\cdot\frac{\cos\alpha_t}{\cos\alpha_{wt}}$$

dok za pogonski zahvatni kut α_w odnosno α_{wt} vrijedi za:

– ravno ozubljenje
$$\text{inv}\,\alpha_w = \frac{2(x_1 + x_2)}{z_1 + z_2}\tan\alpha + \text{inv}\,\alpha$$

– koso ozubljenje
$$\text{inv}\,\alpha_{wt} = \frac{2(x_{t1} + x_{t2})}{z_1 + z_2}\tan\alpha_t + \text{inv}\,\alpha_t$$
$$= \frac{2(x_{n1} + x_{n2})}{z_1 + z_2}\tan\alpha_n + \text{inv}\,\alpha_t$$
$$(x_n = x_t/\cos\beta)$$

Zbroj faktora pomaka profila (za poznati osni razmak)

– ravno ozubljenje $$x_1 + x_2 = \frac{\text{inv}\ \alpha_w - \text{inv}\ \alpha}{2\tan\alpha_w}\,(z_1 + z_2)$$

– koso ozubljenje $$x_{t1} + x_{t2} = \frac{\text{inv}\ \alpha_{wt} - \text{inv}\ \alpha_t}{2\tan\alpha_{wt}}\,(z_1 + z_2)$$

dok za pogonski zahvatni kut α_w odnosno α_{wt} vrijedi za:

– ravno ozubljenje $$\alpha_w = \text{arc}\cos\left(\frac{z_1 + z_2}{2\,a}\ m\cos\alpha\right)$$

– koso ozubljenje $$\alpha_{wt} = \text{arc}\cos\left(\frac{z_1 + z_2}{2\,a}\ m_t\cos\alpha_t\right)$$

Promjeri kinematičkih kružnica

– ravno ozubljenje $$d_{w1} = d_1\,\frac{\cos\alpha}{\cos\alpha_w}\quad d_{w2} = d_2\,\frac{\cos\alpha}{\cos\alpha_w}$$

– koso ozubljenje $$d_{w1} = d_1\,\frac{\cos\alpha_t}{\cos\alpha_{wt}}\quad d_{w2} = d_2\,\frac{\cos\alpha_t}{\cos\alpha_{wt}}$$

Mjerni broj zuba

– ravno ozubljenje $$k = \frac{z}{\pi}\,(\tan\alpha_x - \text{inv}\ \alpha) - \frac{2\,x\tan\alpha}{\pi} + 0{,}5$$

– koso ozubljenje $$k = \frac{z}{\pi}\left(\frac{\tan\alpha_{xt}}{\cos^2\beta_b} - \text{inv}\ \alpha_t\right) - \frac{2\,x_t\tan\alpha_t}{\pi} + 0{,}5$$

gdje je

– ravno ozubljenje $$\tan\alpha_x = \sqrt{\tan^2\alpha + \frac{4\,(x/z)\,(1 + x/z)}{\cos^2\alpha}}$$

– koso ozubljenje $$\tan\alpha_{xt} = \sqrt{\tan^2\alpha_t + \frac{4\,(x_t/z)\,(1 + x_t/z)}{\cos^2\alpha_t}}$$

– ravno ozubljenje
– koso ozubljenje } $\beta_b = \text{arc}\sin\,(\sin\beta\ \cos\alpha_n)$

Mjerni broj zuba k zaokružujemo na najbliži cijeli broj.

Ako je $x = 0$, dobivamo:

– ravno ozubljenje $k = (z\,\hat{\alpha}/\pi) + 0{,}5$

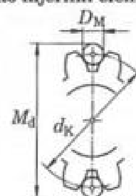
– koso ozubljenje $k = z\,(\hat{\alpha}_t\ \tan\alpha_t \cdot \tan^2\beta_b)/\pi + 0{,}5$

Izmjera preko zubi:

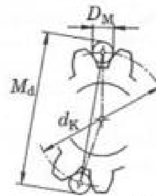
– ravno ozubljenje $W = m\cos\alpha\,[\pi\,(k - 0{,}5) + z\ \text{inv}\ \alpha + 2\,x\tan\alpha]$

– koso ozubljenje $W = m_t\cos\alpha_t\,[\pi\,(k - 0{,}5) + z\ \text{inv}\ \alpha_t + 2\,x_t\tan\alpha_t]\cos\beta_b$

Izmjera preko mjernih elemenata:



parni broj zubi

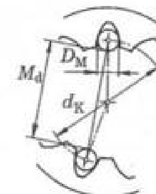


neparni broj zubi

Izmjera između mjernih elemenata:



parni broj zubi



neparni broj zubi

Formule za izračunavanje veličina vrijede za vanjsko i unutarnje ozubljenje, poštuju li se definicije predznaka za broj zubi, te pomaka profila.

– ravno ozubljenje
– koso ozubljenje } $M_d = d_K \cdot f_K + D_M$

Za parni broj zuba je $f_K = 1$, za neparni broj zuba je $f_K = \cos\pi/(2\,z)$; D_M je promjer mjernog elementa (valjak ili kuglica)

– ravno ozubljenje $$d_K = \frac{d_b}{\cos\alpha_K}$$

kut α_K dobije se iz: $$\text{inv}\ \alpha_K = \frac{s}{d} + \text{inv}\ \alpha + \frac{D_M}{d_b} - \frac{\pi}{z}$$

– koso ozubljenje $$d_K = \frac{d_b}{\cos\alpha_{Kt}}$$

kut α_{Kt} dobije se iz: $$\text{inv}\ \alpha_{Kt} = \frac{s_t}{d} + \text{inv}\ \alpha_t + \frac{D_M}{d_b\cos\beta_b} - \frac{\pi}{z}$$

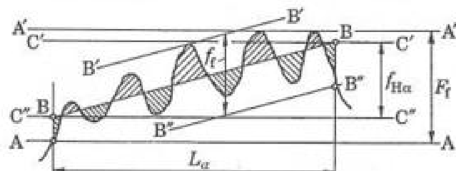
Izmjera M_d i promjer d_K imaju negativan predznak, dok kut α_K, α_{Kt} i promjer D_M imaju uvijek pozitivan predznak.

Tolerancijski sustav za zupčanike s evolventnim ozubljenjem

Norma DIN 3961 ima za cilindrične zupčanike 12 tolerancijskih razreda (stariji naziv: kvaliteta). Finiji razredi su predviđeni za etalonske zupčanike iznimnih namjena.

Tolerancije se izračunavaju po formulama. Vrijednost izračunana po formuli spada u tolerancijski razred $n = 5$. Za grublje tolerancijske razrede ta se vrijednost mora pomnožiti s korekcijskim faktorom φ (geometrijski razlozi). Kod računanja je za m_n i d potrebno rabiti geometrijske srednje vrijednosti predočene u tablici na str. 636; tako je $d = \sqrt{d_i d_e}$, te $m_n = \sqrt{m_{ni} m_{ne}}$. Izračunanu vrijednost u µm treba zaokružiti na normalnu vrijednost (tablica na str. 541).

Pojedinačna odstupanja



L_α područje mjerenja bočne crte

Odstupanje oblika boka $f_f = 1{,}5 + 0{,}25\ (m_n + 9\sqrt{m_n})$

Odstupanje kuta profila $f_{H\alpha} = 2{,}5 + 0{,}25\ (m_n + 3\sqrt{m_n})$

Ukupno odstupanje boka $F_f = \sqrt{f_{H\alpha}^2 + f_f^2}$

Pojedinačno odstupanje koraka

$$f_p = f_{pe} = f_{pb} = 4 + 0{,}315\ (m_n + 0{,}25 \cdot \sqrt{d})$$

Skok odstupanja koraka $f_u = 5 + 0{,}4\ (m_n + 0{,}25 \cdot \sqrt{d})$

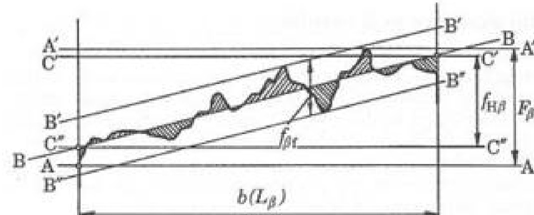
Ukupna odstupanja koraka $F_p = 7{,}25\ \dfrac{d^{1/3}}{z^{1/7}}$

Korekcijski faktori: za vrijednosti n do 9 je $\varphi = 1{,}4$; za vrijednosti n iznad 9 je $\varphi = 1{,}6$.

Odstupanje kružnosti

$$F_r = 1{,}68 + 2{,}18\sqrt{m_n} + (2{,}3 + 1{,}2 \log m_n) \cdot d^{1/4}$$

pri čemu je faktor za sve vrijednosti $n = 6 - 12$ jednak, $\varphi = 1{,}4$.



$b(L_\beta)$ područje mjerenja izvodnice bloka

Ukupno odstupanje bočne linije $F_\beta = 0{,}8 \cdot \sqrt{b} + 4$

Odstupanje kuta bočne linije $f_{H\beta} = 4{,}16\ b^{0{,}14}$

Odstupanje oblika bočne linije $f_{\beta f} = \sqrt{F_\beta^2 - f_{H\beta}^2}$

Korekcijski faktori: za vrijednosti n do 6 je $\varphi = 1{,}32$, za vrijednosti n iznad 6 do uključujući 8 je $\varphi = 1{,}4$ te za vrijednosti n iznad 8 do uključujući 12 je $\varphi = 1{,}55$.

Odstupanja sprezanjem (ukupna odstupanja)

Funkcionalne metode ispitivanja:

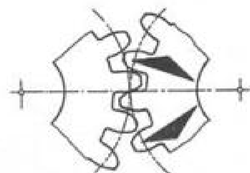
Ukupno odstupanje pri tangencijalnom ispitivanju

$$F_i' = 0{,}8\ (F_p + F_f)$$

Skok odstupanja pri tangencijalnom ispitivanju

$$f_i' = 0{,}7\ (f_p + F_f).$$

Korekcijski faktor: za vrijednosti n do uključujući 9 je $\varphi = 1{,}4$, a za vrijednosti n iznad 9 je $\varphi = 1{,}6$.



Tangencijalno ispitivanje

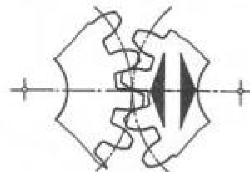
Ukupno odstupanje pri radijalnom ispitivanju

$$F_i'' = 2 + 2{,}57 \cdot \sqrt{m_n} + (0{,}432 \log m_n)\ d^{1/4}$$

Skok odstupanja pri radijalnom ispitivanju

$$f_i'' = 1{,}8\sqrt{m_n} + 1{,}6\ d^{1/4} - 1$$

gdje je korekcijski faktor za sve vrijednosti $n = 6 - 12$ jednak, $\varphi = 1{,}4$.



Radijalno ispitivanje

Dosjedni sustav za prijenosnike

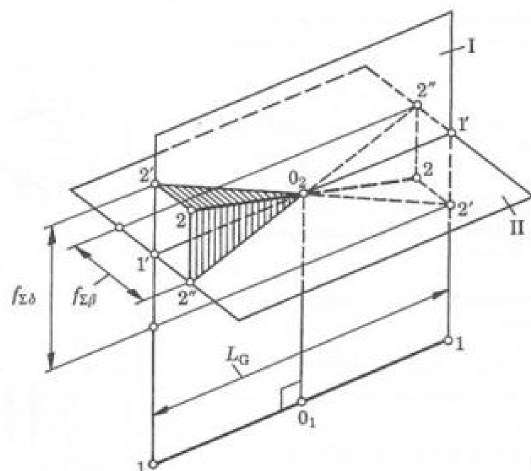
Razlikujemo dva dosjedna sustava: sustav debljine zuba i sustav međuosnog razmaka. Pri prvom je temelj stalna tolerancija debljine zuba T_{sn}, tj. položaj tolerancijskog polja h s obzirom na nul-liniju, te mu dodajemo toleranciju međuosnog razmaka T_a, prema položaju tolerancijskih polja JS, K, M, N, P itd. Pri drugom je temelj stalno jednaka tolerancija međuosnog razmaka T_a, tj. položaj tolerancijskog polja JS s obzirom na nul-liniju, te mu pridodajemo toleranciju debljine zuba T_{sn}, prema položaju tolerancijskih polja h, g, f, e, d, c itd.

Položaj polja izabran je tako da sustav mora osiguravati bočni razmak (iznimka je sustav JS/h).

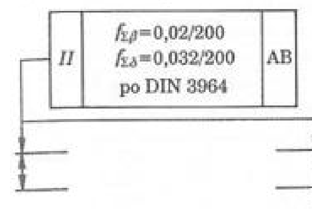
Za prijenosnički dosjedni sustav u DIN normi preuzet je sustav međuosnog razmaka.

Tolerancije položaja osi:

Osni nagib (inklinacija) $f_{\Sigma\delta}$ je odstupanje paralelnosti osi zupčanika 2 (2–2) od osi zupčanika 1 (1–1) u ravnini I.



Osni otklon (devijacija) $f_{\Sigma\beta}$ je odstupanje paralelnosti osi zupčanika 2 (2–2) od osi zupčanika 1 (1–1) u ravnini II, pravokutnoj na ravninu I.



Primjer označavanja na crtežima za L_G = 195 mm

Tolerancije $f_{\Sigma\beta}$ i $f_{\Sigma\delta}$ (predviđeni tolerancijski razredi su (n=1–12) na crtežu treba pisati u troredni okvir s referentnim strjelicama u smjeru kotne linije za otvore ležaja (na slici lijevo; ili kao što je, na slici desno).

U primjeru su $f_{\Sigma\delta}$ = 0,02 mm za tolerancijski razred 5 i $f_{\Sigma\delta}$ = 0,032 mm za tolerancijski razred 7 (v. tablicu niže).

Tolerancije za osni otklon $f_{\Sigma\beta}$ i osni nagib $f_{\Sigma\delta}$ u µm

Razmak L_G između sredina ležajeva (nazivna izmjera) mm	Tolerancijski razredi položaja osi											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
do 50	5	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50	63
od 50 do 125	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50	63	80
od 125 do 280	8	10	12	16	20	25	32	40	50	63	80	100
od 280 do 560	10	12	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125
od 560 do 1000	12	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160
od 1000 do 1600	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
od 1600 do 2500	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250
od 2500 do 3150	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	320

Za gornje odstupanje mjere međuosnog razmaka A_{ae} *i donje odstupanje* A_{ai} rabe se tolerancijski razredi JS5 do JS11 (po ISO),u ovisnosti o nazivnoj izmjeri međuosnog razmaka a (tablica na str. 636).

Još su dodatno predočeni tolerancijski razredi za položaj osi.

Vrijednosti gornjeg odstupanja $A_{ae}(+)$ i donjeg odstupanja $A_{ai}(-)$ izmjere međuosnog razmaka u µm

Međuosni razmak a (nazivna izmjera) u mm	Toleranciјsko polje JS po ISO 5	6	7	8	9	10	11
	Tolerancijski razredi 1–3 za položaj osi	Tolerancijski razredi 1–3 za položaj osi; 4–6 za položaj osi	Tolerancijski razredi 1–3, 4–6, 7–9 za položaj osi	Tolerancijski razredi 1–3, 4–6, 7–9, 10–12 za položaj osi	Tolerancijski razredi 4–6, 7–9, 10–12 za položaj osi	Tolerancijski razredi 7–9, 10–12 za položaj osi	Tolerancijski razredi 10–12 za položaj osi
od 10 do 18	+4 –4	+5,5 –5,5	+9 –9	+13,5 –13,5	+21,5 –21,5	+35 –35	+55 –55
od 18 do 30	+4,5 –4,5	+6,5 –6,5	+10,5 –10,5	+16,5 –16,5	+26 –26	+42 –42	+65 –65
od 30 do 50	+5,5 –5,5	+8 –8	+12,5 –12	+19,5 –19,5	+31 –31	+50 –50	+80 –80
od 50 do 80	+6,5 –6,5	+9,5 –9,5	+15 –15	+23 –23	+37 –37	+60 –60	+95 –95
od 80 do 120	+7,5 –7,5	+11 –11	+17,5 –17,5	+27 –27	+43,5 –43,5	+70 –70	+110 –110
od 120 do 180	+9 –9	+12,5 –12,5	+20 –20	+31,5 –31,5	+50 –50	+80 –80	+125 –125
od 180 do 250	+10 –10	+14,5 –14,5	+23 –23	+36 –36	+57,5 –57,5	+92,5 –92,5	+145 –145
od 250 do 315	+11,5 –11,5	+16 –16	+26 –26	+40,5 –40,5	+65 –65	+105 –105	+160 –160
od 315 do 400	+12,5 –12,5	+18 –18	+28,5 –28,5	+44,5 –44,5	+70 –70	+115 –115	+180 –180
od 400 do 500	+13,5 –13,5	+20 –20	+31,5 –31,5	+48,5 –48,5	+77,5 –77,5	+125 –125	+200 –200
od 500 do 630	+14 –14	+22 –22	+35 –35	+55 –55	+87 –87	+140 –140	+220 –220
od 630 do 800	+16 –16	+25 –25	+40 –40	+62 –62	+100 –100	+160 –160	+250 –250
od 800 do 1000	+18 –18	+28 –28	+45 –45	+70 –70	+115 –115	+180 –180	+280 –280
od 1000 do 1250	+21 –21	+33 –33	+52 –52	+82 –82	+130 –130	+210 –210	+330 –330
od 1250 do 1600	+25 –25	+39 –39	+62 –62	+97 –97	+155 –155	+250 –250	+390 –390
od 1600 do 2000	+30 –30	+46 –46	+75 –75	+115 –115	+185 –185	+300 –300	+460 –460
od 2000 do 2500	+35 –35	+55 –55	+87 –87	+140 –140	+220 –220	+350 –350	+550 –550
od 2500 do 3150	+43 –43	+67 –67	+105 –105	+165 –165	+270 –270	+430 –430	+675 –675

Gornje odstupanje debljine zuba A_{sne} biramo u ovisnosti o izmjeri razdjelne kružnice i stupnja temeljne tolerancije (a, ab, b, bc, c, cd, d, e, f, g, h); tolerancijski se razred nije poštivao. Pravila za gornje odstupanje izmjere debljine zuba za oba su zupčanika vidljiva iz jednakog stupnja temeljne tolerancije. Zato je dopušten izbor vrijednosti iz različitih stupnjeva temeljnih tolerancija.

Vrijednosti gornjeg odstupanja izmjere debljine zuba A_{sne} u µm:

Diobeni promjer d / mm od	do	Stupnjevi temeljnih tolerancija a	ab	b	bc	c	cd	d	e	f	g	h
–	10	–100	–85	–70	–58	–48	–40	–33	–22	–10	–5	0
10	50	–135	–110	–95	–75	–65	–54	–44	–30	–14	–7	0
50	125	–180	–150	–125	–105	–85	–70	–60	–40	–19	–9	0
125	280	–250	–200	–170	–140	–115	–95	–80	–56	–26	–12	0
280	560	–330	–280	–230	–190	–155	–130	–110	–75	–35	–17	0
560	1000	–450	–370	–310	–260	–210	–175	–145	–100	–48	–22	0
1000	1600	–600	–500	–420	–340	–290	–240	–200	–135	–64	–30	0
1600	2500	–820	–680	–560	–460	–390	–320	–270	–180	–85	–41	0
2500	4000	–1100	–920	–760	–620	–520	–430	–360	–250	–115	–56	0
4000	6300	–1500	–1250	–1020	–840	–700	–580	–480	–330	–155	–75	0
6300	10000	–2000	–1650	–1350	–1150	–940	–780	–640	–450	–210	–100	0

Donje odstupanje izmjere debljine zuba A_{sni} dobivamo kombiniranjem gornjeg odstupanja mjere debljine zuba A_{sne} i tolerancije debljine zuba T_{sn}. Budući da oba odstupanja vidljivo imaju negativne predznake, potrebno je tolerancijsku vrijednost oduzeti od gornjeg odstupanja:

$$A_{sni} = A_{sne} - T_{sn}\,.$$

Izbor *tolerancije debljine zuba* T_{sn} nije ovisan o tolerancijskom razredu. Zbog jasnijeg razlikovanja među razredima, tolerancijski redovi su označeni brojevima 21 ... 30; redovi s prednošću su 24 ... 27 (tablica na str. 638).

Bočni razmak

$$j_t = \frac{A_{sn1} + A_{sn2}}{\cos\beta} + A_a\,\frac{\tan\alpha_n}{\cos\beta}$$

Vrijednosti tolerancije debljine zuba T_{sn} u µm

Diobeni promjer d / mm		Tolerancijski redovi									
od	do	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
-	10	3	5	8	12	20	30	50	80	130	200
10	50	5	8	12	20	30	50	80	130	200	300
50	125	6	10	16	25	40	60	100	160	250	400
125	280	8	12	20	30	50	80	130	200	300	500
280	560	10	16	25	40	60	100	160	250	400	600
560	1000	12	20	30	50	80	130	200	300	500	800
1000	1600	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000
1600	2500	20	30	50	80	130	200	300	500	800	1300
2500	4000	25	40	60	100	160	250	400	600	1000	1600
4000	6300	30	50	80	130	200	300	500	800	1300	2000
6300	10000	40	60	100	160	250	400	600	1000	1600	2400

*

Da bi među odstupanjima ozubljenja lako razlučili samo one odlučujuće za predviđenu funkciju, u tolerancijskom sustavu ozubljenja definirane su četiri skupine s različitim funkcijskim značenjima.

Funkcijska skupina		Pojedina odstupanja
G	Jednoličnost prijenosa gibanja	F_i' f_i' F_p F_i'' F_r f_i''
L	Mirni rad i dinamička nosivost	f_i' f_p (f_{pe}) f_i'' F_β $f_{H\beta}$ F_p (F_r)
T	Statička nosivost	f_{pe} $f_{H\beta}$ TRA [1]
N	Bez podataka o funkciji	F_i'' $f_{H\beta}$ F_f f_i''

Pored pojedinih odstupanja nazočne su i druge veličine, koje utječu na pogonske značajke (npr. mirni je rad ovisan o frekvenciji vrtnje, nosivost o kakvoći površine bokova zuba, tvari i njegova stanja, itd).

U praksi se najčešće zahtijeva samo pogonska značajka bez funkcijskih zadaća (funkcijska skupina N). Tada se napiše samo jedan tolerancijski razred ozubljenja, npr. n = 8; podatak: N8. Možemo udružiti i dvije funkcijske skupine s različitim tolerancijskim razredima npr. G8, L7, itd. Za napomenuti je da će tada odabrane veličine za mirni rad tolerancijske finoće (n = 7) biti finije nego za ravnomjernost prijenosa (n = 8).

[1] Nosiva površina.

Proračun čvrstoće čelnika (po DIN 3990 – 1987)

Nazivni okretni moment

$$T_1 = \frac{P}{2\,\pi\, n_1}\,.$$

Nazivna obodna sila

$$F_t = \frac{2\,T_1}{d_1} = \frac{P}{d_1 \pi\, n_1}\,.$$

Projektni proračun [1]

Promjer diobene kružnice na pogonskom zupčaniku

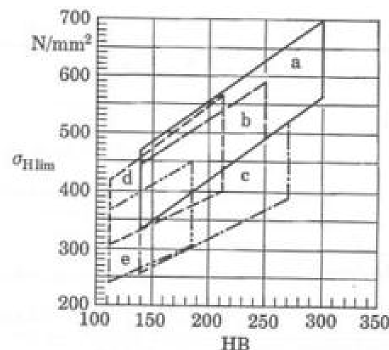
$$d_1 \geq \sqrt{\frac{2\,T_1}{b} \cdot \frac{u+1}{u}} \cdot \frac{S_{H\,min}}{\sigma_{H\,lim}} \cdot \frac{Z_E}{Z_{NT}} \cdot Q_H$$

gdje su:

- b širina korisnog dijela zubnog boka
- u odnos broja zubi (= z_2/z_1)
- $S_{H\,min}$ najmanji faktor sigurnosti boka ($S_{H\,min}$ = 1,3; u iznimnim slučajevima $S_{H\,min}$ = 1,6)
- $\sigma_{H\,min}$ dinamička čvrstoća za bočni tlak (Hertzov tlak), (v. sliku na str. 640).

Smjernice za određivanja $\sigma_{H\,lim}$ u ovisnosti od površinske tvrdoće HB:

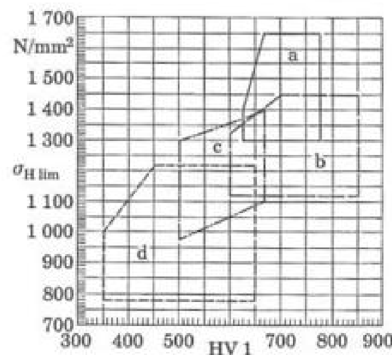
a – sivi lijev s kuglastim grafitom
b – temperirani lijev (crni)
c – sivi lijev s ljuskastim grafitom
d – ugljični čelik (normalno žaren)
e – čelični lijev



Z_E – koeficijent elastičnosti (v. tablicu na str. 640)

[1] Primjenjena je metoda C (Druge metode: A, B, D.)

Smjernice sa $\sigma_{H\,lim}$ u ovisnosti od površinske tvrdoće HV1:



a – legirani čelik za cementiranje (površinski otvrdnut)
b – čelik za nitriranje
c – čelik za poboljšanje (plameno ili indukcijsko kaljen)
d – čelik za poboljšanje (površinski otvrdnut potapanjem u kupelj, ili nitriran u plinu)

Vrijednosti Z_E za različite kombinacije tvari

Kombinacije tvari z_1	z_2	Z_E $\sqrt{N/mm^2}$
čelik	čelik	189,8
	čelični lijev	188,9
	sivi lijev s kuglastim grafitom	181,4
	sivi lijev sa ljuskastim grafitom	165,4
čelični lijev	čelični lijev	188,0
	sivi lijev s kuglastim grafitom	180,5
	sivi lijev sa ljuskastim grafitom	161,4
sivi lijev s kuglastim grafitom	sivi lijev s kuglastim grafitom	173,9
	sivi lijev sa ljuskastim grafitom	156,6
sivi lijev sa ljuskastim grafitom	sivi lijev sa ljuskastim grafitom	146,0 – 143,7

Z_{NT} – faktor vremena trajanja

Vrijednosti Z_{NT} za statičku i dinamičku čvrstoću

Tvar	Broj promjena N_L	Faktor vremena trajanja Z_{NT}
čelik ($R_m <$ 800 N/mm²) čelik (poboljšan, $R_m \geq$ 800 N/mm²) temperirani lijev (crni, perlitna struktura) čelici za cementiranje čelici (površinsko otvrdnut)	$N \leq 6.10^5$ statički	1,6
	$N_L \geq 10^9$ dinamički	1
čelici (poboljšani, $R_m \geq$ 800 N/mm²) sivi lijev (s kuglastim grafitom; perlitna, bainitna, feritna struktura)	$N_L \leq 10^5$ statički	1,6
	$N_L \geq 5.10^7$ dinamički	1

$$Q_H = \frac{Q_{HA}\,Q_{HB}}{Q_{HD}} \qquad Q_{HA} = \sqrt{K_A\ K_V\ K_{H\beta}}$$

$$Q_H = 1{,}7 \qquad Q_{HB} = \sqrt{H_{H\alpha}} \cdot Z_B\ Z_H\ Z_\varepsilon\ Z_\beta$$

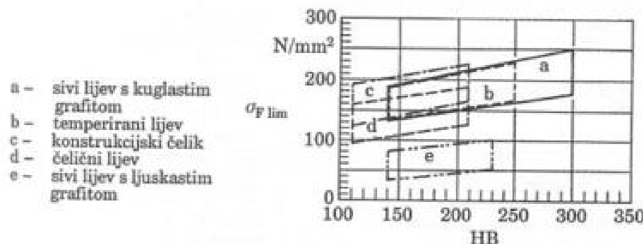
$$Q_{HD} = Z_L\ Z_V\ Z_R\ Z_W\ Z_K$$

Normalni modul

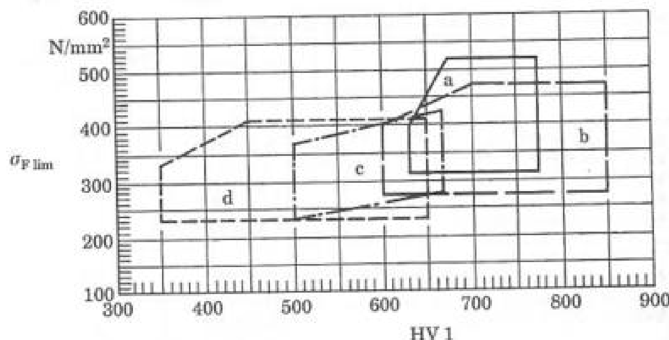
$$m_n \geq \frac{2\,T_1}{d_1\,b} \cdot \frac{S_{F\,min}}{\sigma_{F\,lim}} \cdot \frac{Y_{FS}}{Y_{ST}\,Y_{VT}}\,Q_F$$

S_{Fmin} – faktor sigurnosti za naprezanje korijena ($S_{f\,min} \geq 1{,}7$)
σ_{Flim} – dinamička čvrstoća za savojno naprezanje

Smjernice za izbor σ_{Flim} u ovisnosti o površinskoj tvrdoći HB:



Smjernice za izbor $\sigma_{F\,lim}$ u ovisnosti o površinskoj tvrdoći HV 1:



a – legirani čelik za cementiranje (površinski otvrdnut)
b – čelik za nitriranje
c – čelik za poboljšanje (plameno ili indukcijski kaljen)
d – čelik za poboljšanje (površinski otvrdnut potapanjem u kupelj, u plinu)

Y_{FS} – faktor oblika

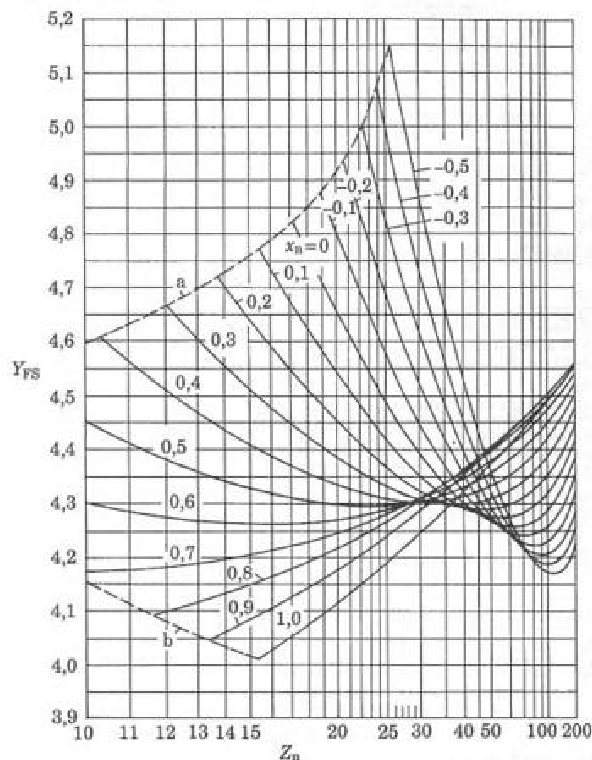
Y_{ST} – korekcijski faktor naprezaja (Y_{ST} = 2)

Y_{VT} – faktor vremena trajanja (broja promjena)

Y_{NT} – za statičku i dinamičku čvrstoću:

Tvar	Broj promjena N_L	Faktor vremena trajanja Y_{NT}
čelik (R_m < 800 N/mm²) čelik (poboljšan, $R_m \leq$ 800 N/mm²) sivi lijev (crn, perlitna bainitna struktura) temperirani lijev (crn , perlitna struktura)	N ≤ 10⁴ statički	2,5
	N_L > 3.10⁶ dinamički	1
čelici za cementiranje (površinski otvrdnuti) čelici (plameno ili indukcijski kaljeni)	$N_L \leq$ 10³ statički	2,5
	N_L > 3.10⁶ dinamiči	1
čelici za nitriranje i poboljšanje (nitrirani) sivi lijev (feritna struktura) sivi lijev s kuglastim grafitom	$N_L \leq$ 10³ statički	1,6
	N_L > 3.10⁶ dinamički	1

Y_{FS} za vanjsko ozubljenje sa normalnim profilom (α_n = 20°, h_{aP}/m_n = 1, h_{fP}/m_n = 1,25, ϱ_{fP}/m_n = 0,25); $z_n = z/(\cos^2\beta_b \cos\beta) \approx z/\cos^3\beta$:



a – granica podrezanosti zubnih bokova, b – granica zašiljenosti zubnih vrhova

Za nutarnje ozubljenje s $\varrho_F = \varrho_{fP}/2$ (uobičajni primjer) i $h = h_{fP} + h_{aP}$ je Y_{FS} = 5,793; pri punom zaobljenju korijena je Y_{FS} = 4,63.

$$Q_F = \frac{Q_{FA}\,Q_{FB}}{Q_{FD}} \qquad Q_F \approx 0,6$$

$$Q_{FA} = K_A\,K_V\,K_{F\beta} \qquad Q_{FB} = Y_\varepsilon\,Y_\beta\,Y_{F\alpha} \qquad Q_{FD} = Y_{\delta\,rel\,T}\,Y_{R\,rel\,T}\,Y_S$$

Provjeravanje podataka iz prvog proračuna

Faktor sigurnosti S_H u odnosu na bočni tlak

$$S_H = \frac{Z_{NT}\, Z_L\, Z_v\, Z_R\, Z_W\, Z_X}{Z_B\, Z_H\, Z_E\, Z_\varepsilon\, Z_\beta \sqrt{K_A\, K_V\, K_{H\beta}\, H_{H\alpha}}} \cdot \frac{\sigma_{H\,lim}}{\sqrt{\frac{2\,T_1}{b\,d_1^2} \cdot \frac{u+1}{u}}} \geq S_{H\,min}$$

Z_L faktor podmazivanja
Z_v faktor brzine
Z_R faktor hrapavosti
Z_W faktor sparivanja tvari ($Z_W = 1$)
Z_X faktor veličine

Postupkom C je
$Z_L\, Z_v\, Z_R = 0{,}85$ za odvalno glodane ili dubljene zube
$Z_L\, Z_v\, Z_R = 1$ za grecane ili brušene zube

Z_X za statičku i dinamičku čvrstoću

Tvar		Normalni modul m_n	faktor veličine Z_X
čelici (R_M < 800 N/mm²) čelici za poboljšanje (poboljšani, $R_M \geq$ 800 N/mm²) sivi lijev sivi lijev s kuglastim grafitom	za dinamičku čvrstoću	svi moduli	$Z_X = 1$
čelici za cementiranje (površinski otvrdnuti) čelici i sivi lijev s kuglastim grafitom (plameno ili indukcijski kaljeni)	za dinamičku čvrstoću	$m_n \leq 10$ $10 < m_n < 30$ $30 \leq m_n$	$Z_X = 1$ $Z_X = 1{,}05 - 0{,}005\, m_n$ $Z_X = 0{,}9$
čelici za nitriranje (nitrirani)	za dinamičku čvrstoću	$m_n \leq 7{,}7$ $7{,}5 < m_n < 30$ $30 \leq m_n$	$Z_X = 1$ $Z_X = 1{,}08 - 0{,}011\, m_n$ $Z_X = 0{,}75$
sve tvari za statičku čvrstoću		svi moduli	$Z_X = 1$

Z_B faktor zahvata ($Z_B = 1$)
Z_H koeficijent oblika zubnog boka

$$Z_H = \sqrt{\frac{\cos\beta_b}{\tan\alpha_{wt}}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\cos\alpha_t}$$

Z_E koeficijent elastičnosti
Z_ε faktor stupnja prekrivanja

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\left[\frac{4-\varepsilon_\alpha}{3}(1-\varepsilon_\beta) + \frac{\varepsilon_\beta}{\varepsilon_\alpha}\right]\cos\beta_b} \qquad \text{za} \quad \varepsilon_\beta \leq 1$$

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_\alpha}} \qquad \text{za} \quad \varepsilon_\beta \geq 1$$

gdje su

$$\varepsilon_\alpha = \frac{z_1}{2\,\pi}\,[\tan\alpha_{a1} + u\,\tan\alpha_{a2} - (u+1)\tan\alpha_{wt}]$$

$$\tan\alpha_a = \sqrt{(d_a / d_b)^2 - 1} \qquad \varepsilon_\beta = \frac{b\,\sin\beta}{m_n\,\pi}$$

Z_β faktor zubnog nagiba

$$Z_\beta = \sqrt{\cos\beta}$$

K_A faktor primjene

K_A za različite slučajeve opterećenja

Opterećenja od pogonskog stroja	Opterećenja od gonjenog stroja: jednolična	umjereno udarna	srednje udarna	jako udarna
jednolična (elektromotor, parna i plinska turbina)	1,00	1,25	1,50	1,75
umjereno udarna (parne i plinske turbine, hidromotori, elektromotori) [1]	1,10	1,35	1,60	1,85
srednje udarna (višecilindrični motori s unutarnjim izgaranjem)	1,25	1,50	1,75	2,00
jako udarna (jednocilindrični motori s unutarnjim izgaranjem)	1,50	1,75	2,00	2,25 i više

$$K_V = 1 + \left(\frac{K_1}{K_A\, F_t / b} + K_2\right)\frac{z_1\,v}{100} \cdot \sqrt{\frac{u^2}{1+u^2}}$$

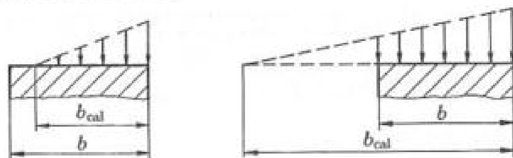
Ako je vrijednost $K_A \cdot F_t /b$ < 100 N/mm, treba je staviti približno 100 N/mm.

Faktori K_1 i K_2

Vrsta ozubljenja	K_1 tolerancijski razred ozubljenja po DIN 3962: 6	7	8	9	10	11	K_2 Za sve tolerancijske razrede ozubljenja
ravno	9,6	15,3	24,5	34,5	53,6	76,6	0,0193
koso	8,5	13,6	21,8	30,7	47,7	68,2	0,0087

[1] Sa češćim uključivanjem.

$K_{H\beta}$ – faktor razdiobe sile po širini zuba



$$K_{H\beta} = \frac{b}{b_{cal}} \quad za \quad \frac{b_{cal}}{b} \le 1 \qquad K_{H\beta} = \frac{2\, b_{cal} / b}{2\,(b_{cal} / b) - 1} \quad za \quad \frac{b_{cal}}{b} \ge 1$$

$K_{H\alpha}$ – faktor razdiobe sile u ravnini profila

Faktor $K_{H\alpha}$

$\frac{F_t}{b} K_A$		> 100 N/mm						≤ 100 N/mm
Tolerancijski razred ozubljenja DIN 3961		6	7	8	9	10	11	6 i više
Toplinska obradba (cementiranje, površinsko kaljenje, nitriranje)	ravno ozubljene	1,0	1,0	1,1	1,2	≥ 1,2	≥ 1,2	≥ 1,2
	koso ozubljenje	1,0	1,0	1,2	1,4	≥ 1,4	≥ 1,4	≥ 1,4
Bez toplinske obradbe	ravno ozubljene	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	≥ 1,2	≥ 1,2
	koso ozubljenje	1,0	1,0	1,1	1,2	1,4	≥ 1,4	≥ 1,4

$\sigma_{H\,lim}$ dinamička bočna čvrstoća (v. slike na str. 639 i 640)

Faktor sigurnosti zubnog korijena S_F

$$S_F = \frac{\sigma_{F\,lim}}{F_t/b\; m_n\, Y_{FS}\, Y_\varepsilon\, Y_\beta} \cdot \frac{Y_{ST}\, Y_{NT}\, Y_{\delta\,relT}\, Y_{R\,relT}\, Y_X}{K_A\, K_V\, K_{F\beta}\, K_{F\alpha}} \ge S_{F\,min}$$

$\sigma_{F\,lim}$ dinamička čvrstoća za savojno naprezanje (v. slike na str. 641 i 642)

Y_{FS} faktor oblika (v. slike na str. 643)

Y_ε faktor stupnja prekrivanja

$$Y_\varepsilon = 0{,}25 + \frac{0{,}75}{\varepsilon_{\alpha n}}$$

pri čemu je

$$\varepsilon_{\alpha n} = \frac{\varepsilon_\alpha}{\cos^2 \beta}.$$

Y_β – faktor zubnog nagiba

$$Y_\beta = 1 - \varepsilon_\beta \frac{\beta}{120°}$$

ako je $\varepsilon_\beta > 1$, uzimamo $\varepsilon_\beta = 1$
ako je $\beta > 30°$, uzimamo $\beta = 30°$

Y_{ST} korekcijski faktor naprezanja ($H_{ST} = 2$)
Y_{NT} faktor broja promjena (v. tablicu na str. 642)
$Y_{\delta\,relT}$ relativni pomoćni broj ($Y_{\delta\,relT} = 1$)
$Y_{R\,relT}$ relativni pomoćni broj ($Y_{R\,relT} = 1$)
Y_X faktor veličine

Faktor Y_X

Tvar		Normalni modul m_n	Faktor veličine Y_X
čelici (R_m 800 N/mm²) čelici za poboljšavanje (poboljšan, $R_m \ge$ 800 N/mm²) sivi lijev sa kuglastim grafitom (perlitna, bainitna struktura) temperirani lijev (crn, perlitna struktura)	za dinamičku čvrstoću	$m_n \le 5$ $5 < m_n < 30$ $30 \le m_n$	$Y_X = 1{,}0$ $Y_X = 1{,}03 - 0{,}006\, m_n$ $Y_X = 0{,}85$
čelik za cementiranje (površinski otvrdnut), čelici i sivi lijev s kuglastim grafitom (indukcijski ili plameno kaljen), čelici za nitriranje i poboljšanje (nitrirani)		$m_n \le 5$ $5 < m_n < 25$ $25 \le m_n$	$Y_X = 1{,}0$ $Y_X = 1{,}05 - 0{,}01\, m_n$ $Y_X = 0{,}8$
sivi lijev sivi lijev s kuglastim grafitom (feritna struktura)		$m_n \le 5$ $5 < m_n < 25$ $25 \le m_n$	$Y_X = 1{,}0$ $Y_X = 1{,}075 - 0{,}015\, m_n$ $Y_X = 0{,}7$
sve tvari za statičko opterećenje			$Y_X = 1{,}0$

K_A faktor primjene (v. tablicu na str. 645)
K_V dinamički faktor (v. formulu i tablicu na str. 645)
$K_{F\beta}$ faktor razdiobe sile uzduž zubne širine

$$K_{F\beta} = (K_{H\beta})^N$$

gdje je:

$$N = \frac{(b/h)^2}{1 + b/h + (b/h)^2}$$

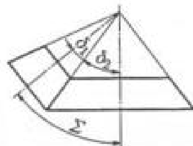
$K_{F\alpha}$ faktor razdiobe sile u čeonoj ravnini ($K_{F\alpha} = K_{H\alpha}$ (v. tablicu na str. 646)

Parovi stožnika (DIN 3971 – 1980)

Prijenosni omjer $i = \dfrac{n_a}{n_b}$ Omjer broja zubaca $u = \dfrac{z_2}{z_1}$

gdje su: n_a i n_b brzine vrtnje pogonskog i gonjenog zupčanika
z_1 i z_2 brojevi zubaca pogonskog i gonjenog zupčanika.

Kutovi kinematičkih stožaca δ_1 i δ_2 ovise o prijenosnom omjeru i te o međuosnom kutu $\Sigma = \delta_1 + \delta_2$:

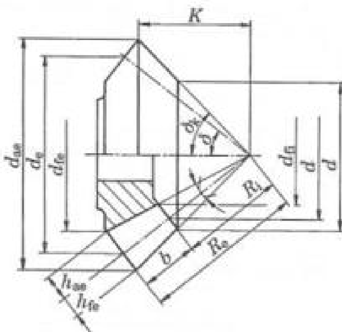


$$\delta_1 = \text{arc tan}\,\frac{\sin\Sigma}{u + \cos\Sigma}$$

$$\delta_2 = \text{arc tan}\,\frac{i\sin\Sigma}{1 + u\cos\Sigma}$$

$$\frac{\sin\delta_2}{\sin\delta_1} = u = \frac{z_2}{z_1}$$

Izmjere stožnika. Promjeri kinematičkih kružnica



vanjski $d_e = 2\,R_e \sin\delta$

unutarnji $d_i = 2\,R_i \sin\delta$

gdje su duljine izvodnice stošca

R_e – vanjska, R_i – unutarnja

$$R_e = \frac{d_e}{2\sin\delta} = \frac{z\,m_{te}}{2\sin\delta}$$

Promjeri tjemenih kružnica

$$d_{ae} = d_e + 2\,h_{ae}\cos\delta$$
$$d_{ai} = d_i + 2\,h_{ai}\cos\delta$$

Promjeri korijenskih kružnica

$$d_{fe} = d_e - 2\,h_{fe}\cos\delta$$
$$d_{fi} = d_i - 2\,h_{fi}\cos\delta$$

h_{ae} (h_{fe}) i h_{ai} (h_{fi}) su visine vrha (odn. korijena) zubaca za vanjske i unutarnje duljine izvodnice stošca.

Udaljenost vanjske tjemene kružnice

$$K = R_e\cos\delta - h_{ae}\sin\delta = d_e/2 - h_{ae}\sin\delta$$

Kut tjemenog stošca	$\delta_a = \delta + \vartheta_a$	$\vartheta_a = \text{arc tan}\,(h_{ae}/R_e)$
Kut podnožnog stošca	$\delta_f = \delta - \vartheta_f$	$\vartheta_f = \text{arc tan}\,(h_{fe}/R_e)$
Korak – kutni	$\tau = 2\,\pi/z$	$\tau_1/\tau_2 = z_2/z_1 = i$
– lučni	$p_t = \tau d_e/2 = d_e\,\pi/z = m_t\,\pi$	
Modul	$m_t = p_t/\pi = d_e/z$	

Parovi hiperboloidnih zupčanika

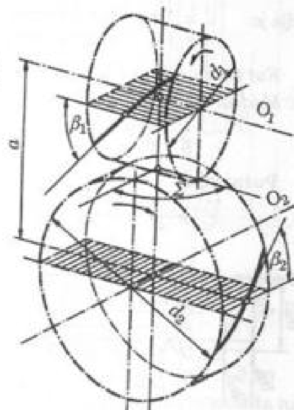
Evolventni hiperboloidni parovi zupčanika

Prijenosni omjer $i = \dfrac{n_a}{n_b}$ Omjer broja zubaca $u = \dfrac{z_2}{z_1}$

gdje su: n_a i n_b brzine vrtnje pogonskog i gonjenog zupčanika
z_1 i z_2 brojevi zubaca pogonskog i gonjenog zupčanika.

Međuosni kut je

$$\Sigma = \beta_1 + \beta_2$$



gdje su: β_1 i β_2 kutovi nagiba bočnih linija u pogonskog i gonjenog zupčanika.

Promjeri diobenih kružnica:

– pogonskog zupčanika

$$d_1 = \frac{z_1\,m_n}{2\cos\beta_1}$$

– gonjenog zupčanika

$$d_2 = \frac{z_2\,m_n}{2\cos\beta_2}$$

Za kut među osima

$\Sigma = \beta_1 + \beta_2 = 90°$ iznose:

– razmak osi a

$$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m_n}{2}\left(\frac{z_1}{\cos\beta_1} + \frac{z_2}{\sin\beta_2}\right) = \frac{z_1\,m_n}{2}\left(\frac{1}{\cos\beta_1} + \frac{u}{\sin\beta_1}\right)$$

– kutovi nagiba bočne linije β_1 i β_2

$$\left.\begin{aligned}\beta_1 &\geq \text{arc tan}\,\sqrt[3]{i}\\ \beta_2 &= 90° - \beta_1\end{aligned}\right\}\quad \text{ako je}\quad \frac{1}{\cos\beta_1} + \frac{u}{\sin\beta_1} = \frac{2\,a}{z_1\,m_n}$$

– razmak osi za prijenosni omjer $u = 1$

$$a = \frac{z_1\,m_n}{\sin 2\,\beta_1}(\sin\beta_1 + \cos\beta_1)$$

gdje je

$$\beta_1 = \text{arc sin}\,\frac{1}{2\,K^2}\left(1 + \sqrt{1 + 4\,K^2}\right)$$

$$K = a/(z_1\,m_n)$$

Cilindrični pužni prijenos (ISO) (DIN 3975 - 1976)

S obzirom na oblik bokova zubaca pužnog vijka, koji je ovisan o postupku obradbe, razlikuju se parovi cilindričkog pužnog prijenosa ZA (oblika bokova A), ZN (oblika bokova N), ZI (oblika bokova I) i ZK (oblika bokova K).

Prijenosni omjer $i = \frac{n_a}{n_b}$ Omjer broja zubaca $u = \frac{z_2}{z_1}$

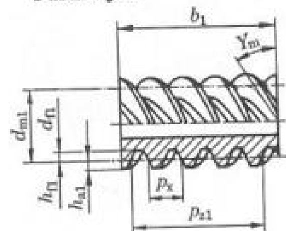
gdje je: n_a i n_b brzina vrtnje pužnog vijka i pužnog kola
z_1 i z_2 broj zubaca pužnog vijka i pužnog kola.

Kut među osima Σ je po volji, uobičajeno je $\Sigma = 90°$.

Moduli m (mm):

1	1,25	1,5	2	2,5	3	4
5	6	8	10	12	16	20

Pužni vijak



Promjer središnjeg pužnog valjka

$$d_{m1} = m\,q$$

Širina pužnog zuba

$$b_1 \geq 2\,m\,\sqrt{z_2 + 1}$$

Pužna značajka q 1. prednost: 8 10 12 16 20
2. prednost: 7 9 11 14 18

Kut središnje zavojnice $\gamma_m = \arctan(z_1/q) = \arctan(m\,z_1/d_{m1})$

Osni korak $p_x = m\,\pi$

Debljina zupca (širina međuzublja) na središnjem valjku u ravnini presjeka kroz os $s_{mx} = e_{mx} = m\,\pi/2$

Korak zavojnice $p_{z1} = z_1 p_x = z_1 m\,\pi$

Visina zupčanog vrha $h_{a1} = m$

U posebnim slučajevima može visina vrha zupca biti nešto veća ili manja od m.

Visina zubnog korijena $h_{f1} = m\,(1 + c_1)$

gdje je $c_1 = 0{,}1 \ldots 0{,}3$ $(c_1 \approx 0{,}2)$.

Promjer tjemenog valjka $d_{a1} = d_{m1} + 2\,h_{a1}$

Promjer podnožnog vljka $d_{f1} = d_{m1} - 2\,h_{f1}$

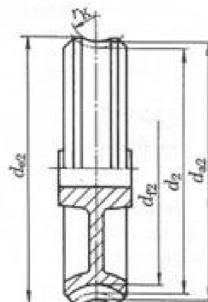
Pužno kolo

Promjer diobene kružnice $d_2 = z_2\,m$

Korak $p_2 = m\,\pi = d_2\,\pi/z_2 = p_x$

Promjer tjemene kružnice

$$d_{a2} = d_2 + 2\,m\,(1 + x)$$



Promjer tjemenog valjka $d_{e2} = d_{a2} + m$

Polumjer anuloidne kružnice $r_K = a - (d_{a2}/2)$

Promjer podnožne kružnice

$$d_{f2} = d_{a2} - 2\,m\,(2 + c_2)$$

Visina zupca $h_2 = h_{a2} + h_{f2}$

Visina zupčanog vrha $h_{a2} = m\,(1 + x)$

Visina zupčanog korijena $h_{f2} = m\,(1 - x + c_2)$

gdje su: $c_2 = 0{,}1 \ldots 0{,}3$ $(c_2 \approx 0{,}2)$
x faktor pomaka profila.

Razmak osi $a = 0{,}5\,(d_{m1} + d_2) + x\,m$

Izbor veličina za pužni prijenos

Broj zubaca pužnog vijka z_1 i mehanička korisnost η_m ovise o prijenosnom omjeru i:

i	5 ... 10	10 ... 15	15 ... 30	> 30
z_1	4	3	2	1
η_m	0,78 ... 0,90	0,75 ... 0,88	0,65 ... 0,85	0,55 ... 0,80

Okretni moment na pužnom kolu T_2 proizlazi iz okretnog momenta na pužnom vijku T_1, prijenosnog omjera i i mehaničke korisnosti η_m

$$T_2 = i\,T_1\,\eta_m\,.$$

Modul procjenjujemo prema jednadžbi

$$m \approx 0{,}43\,\sqrt[3]{\frac{T_2}{p\,z_2}} \qquad m/\text{mm} \quad T_2/(\text{N mm}) \quad p/(\text{N/mm}^2)$$

pri čemu ocjenjujemo bočni tlak s obzirom na tvar pužnog kola:

Tvar	p/(N/mm²)
sivi lijev	2 ... 3
bakrene slitine s kositrom	5 ... 8
aluminijske slitine	4 ... 7

Promjer središnjeg valjka pužnog vijka d_{m1} ocjenjujemo s obzirom na modul m i broj zubaca pužnog vijka z_1:

za puni pužni vijak $d_{m1} \approx 2\,m\,(1{,}4 + 2\sqrt{z_1})$

za navučeni pužni vijak $d_{m1} \approx 2\,m\,(5{,}3 + 0{,}1\,z_1)$

a zatim ga odabiremo s obzirom na $d_{m1} = mq$ (v. 650)

Klizni ležaji



U stanju mirovanja klizne se plohe rukavca i blazinice ležaja dodiruju izravno. Zbog toga se u početku pogona pojavljuje »suho trenje« s razmjerno velikim faktorom trenja μ = 0,1 ... 0,2. U tom je stanju potrebno ulje utiskivati pod tlakom u ležaj.

Kako se brzina vrtnje n povećava, stvara se između rukavca i blazinice uljni film i podmazivanje prelazi postupno u hidrodinamičko, u kojem se faktor trenja snizuje na μ = 0,05 ... 0,01 (a zatim s povećanjem brzine vrtnje opet raste).

Srednji tlak p_{med} u ležaju je $p_{med} = F/d\,l$

gdje su: F sila, koja djeluje okomito na ležaj, d promjer rukavca, l nosiva duljina rukavca: l = (0,5 ... 1) d.

Srednji tlak p_m za različite tvari blazinica približno je u sljedećim granicama:

tvar	p_{med} / N/mm²	tvar	p_{med} / N/mm²
bijela kovina	5 ... 15	sivi lijev	≤ 0,8
olovna bronca	15 ... 35	guma (u vodi)	≤ 0,4

Potrebna relativna zračnost ψ u ležaju za stvaranje uljnog filma:

$$\psi = (D - d)/d$$

gdje su: D promjer blazinice, d promjer rukavca.

Relativna zračnost ψ ovisi o srednjem tlaku p_{med} i brzini vrtnje n.

Vrijednosti relativne zračnosti

Brzina vrtnje n	Relativna zračnost	
	malen p_{med}	velik p_{med}
malena	(0,7 ... 1,2) 10^{-3}	(0,3 ... 0,6) 10^{-3}
velika	(2 ... 3) 10^{-3}	(1,5 ... 2,5) 10^{-3}

Uzimajući u obzir različite koeficijente toplinskog rastezanja, preporučljivo je odabrati sljedeće relativne zračnosti prema tvari blazinice:

tvar	ψ	tvar	ψ
bijela kovina	(0,5 ... 1) 10^{-3}	sinterirano željezo	(1,5 ... 2) 10^{-3}
olovna bronca	(1 ... 1,5) 10^{-3}	umjetne tvari	(3 ... 4) 10^{-3}
aluminijske slitine	(2 ... 3) 10^{-3}		

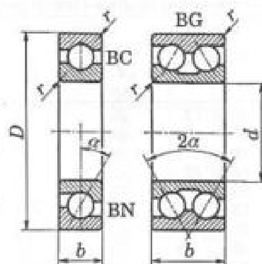
Toplina trenja

Toplinski tok Φ, koji nastaje trenjem pri obodnoj brzini rukavca v, iznosi

$$\Phi = \mu F v,$$

a prelazi uglavnom na mazivo, zbog čega se ono mora hladiti.

Valjni ležaji (ISO)



Kuglični ležaji (Nizovi BC, BN i BG)
(HRN M.C3.601/611/621 – 1966)

Niz BC: jednoredni kuglični ležaji, obični (α = 0, v. str. 674)

Niz BN: jednoredni kuglični ležaji s kosim dodirom

Niz BG: dvoredni kuglični ležaji s kosim dodirom

Jednoredni kuglični ležaji

Oznaka	d / mm	D / mm	b / mm	r / mm	Nosivost C_0 / kN	Nosivost C / kN
Niz BC 10						
10 BC 10	10	26	8	0,5	1,9	3,4
12	12	28	8	0,5	2,2	3,75
15	15	32	9	0,5	2,55	4,2
17 BC 10	17	35	10	0,5	2,85	4,5
20	20	42	12	1	4,5	6,95
25	25	47	12	1	5	7,5
30 BC 10	30	55	13	1,5	7	10
35	35	62	14	1,5	8,6	12
40	40	68	15	1,5	9,4	12,7
45 BC 10	45	75	16	1,5	12,4	16,3
50	50	80	16	1,5	13,3	17
55	55	90	18	2	17,3	22
60 BC 10	60	95	18	2	19,3	22,8
65	65	100	18	2	21,2	24
70	70	110	20	2	24,5	30
75 BC 10	75	115	20	2	26,6	31,5
80	80	125	22	2	32	37,5
85	85	130	22	2	34	39
90 BC 10	90	140	24	2,5	40	45,5
95	95	145	24	2,5	43	48
100	100	150	24	2,5	43	48
105 BC 10	105	160	26	3	56,5	57
110	110	170	28	3	59	64
120	120	180	28	3	62,5	67
Niz BC 02						
10 BC 02	10	30	9	1	1,98	3,4
12	12	32	10	1	3	5,3
15	15	35	11	1	3,6	5,85
17 BC 02	17	40	12	1,5	4,4	7,2
20	20	47	14	1,5	6,55	9,8
25	25	52	15	1,5	7,1	10,4

Jednoredni kuglični ležaji (*nastavak*)

Oznaka	d mm	D mm	b mm	r mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
30 BC 02	30	62	16	1,5	10	14,6
35	35	72	17	2	13,7	19,6
40	40	80	18	2	16	22,4
45 BC 02	45	85	19	2	18,3	25
50	50	90	20	2	21	27
55	55	100	21	2,5	26	32,5
60 BC 02	60	110	22	2,5	32	40
65	65	120	23	2,5	35,5	44
70	70	125	24	2,5	39	46,5
75 BC 02	75	130	25	2,5	42,5	50
80	80	140	26	3	45,5	55
85	85	150	28	3	55	63
90 BC 02	90	160	30	3	63	71
95	95	170	32	3,5	72	80
100	100	180	34	3,5	81,5	90
Niz BC 03						
10 BC 03	10	35	11	1	3,6	6,55
12	12	37	12	1,5	4,3	8
15	15	42	13	1,5	5,2	8,8
17 BC 03	17	47	14	1,5	6,3	10,4
20	20	52	15	2	7,65	12,5
25	25	62	17	2	10,4	16,6
30 BC 03	30	72	19	2	14,6	22
35	35	80	21	2,5	17,6	26
40	40	90	23	2,5	22	31,5
45 BC 03	45	100	25	2,5	30	40,5
50	50	110	27	3	35,5	47,5
55	55	120	29	3	42,5	54
60 BC 03	60	130	31	3,5	48	61
65	65	140	33	3,5	55	69,5
70	70	150	35	3,5	63	78
75 BC 03	75	160	37	3,5	72	85
80	80	170	39	3,5	80	93
85	85	180	41	4	88	102
90 BC 03	90	190	43	4	98	110
95	95	200	45	4	112	120
100	100	215	47	4	132	137
Niz BC 04						
17 BC 04	17	62	17	2	12,1	19,3
20	20	72	19	2	16,9	26
25	25	80	21	2,5	19,7	29
30	30	90	23	2,5	24,3	34,5
35 BC 04	35	100	25	2,5	31,5	43
40	40	110	27	3	37,5	51,5
45	45	120	29	3	47	61,2

Jednoredni kuglični ležaji (*konac*)

Oznaka	d mm	D mm	b mm	r mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
50 BC 04	50	130	31	3,5	53	70
55	55	140	33	3,5	63	79
60	60	150	35	3,5	71	86
65 BC 04	65	160	37	3,5	79,5	90
70	70	180	42	4	106	118
75	75	190	45	4	116	127
80 BC 04	80	200	48	4	127	137
85	85	210	52	5	138	143
90	90	225	54	5	148	153

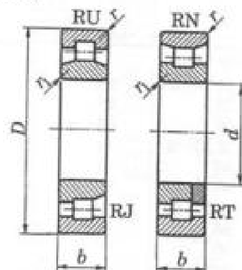
Jednoredni kuglični ležaji (s kosim dodirom)

Oznaka	d, D, b mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN	Oznaka	d, D, b mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz BN 02				*Niz* BN 03			
15 BN 02	kao kod niza BC 02	4,15	6,2	17 BN 03	kao kod niza BC 03	7,8	11,8
17		5,3	7,65	20		9,3	13,7
20		7,35	10,4	25		14,3	19,6
25 BN 02		8,8	11,6	30 BN 03		19,3	25
30		12,7	16,3	35		23,2	30
35		17,3	21,6	40		29	35,5
40 BN 02		21,2	26	45 BN 03		39	46,5
45		24,5	29	50		45,5	54
50		26,5	30,5	55		54	62
55 BN 02		33,5	38	60 BN 03		62	69,5
60		41,5	45,5	65		72	78
65		49	51	70		83	88
70 BN 02		53	56	75 BN 03		93	96,5
75		57	58,5	80		104	106
80		64	65,5	85		116	116
85 BN 02		73,5	72	90 BN 03		129	127
90		86,5	85	95		143	137
95		100	95	100		170	156
100		106	102				
105 BN 02	d = 105 D = 190 b = 36	120	112	105 BN 03	d = 105 D = 225 b = 49	186	170
110 BN 02	d = 110 D = 200 b = 38	134	122	110 BN 03	d = 110 D = 240 b = 50	216	190

Dvoredni kuglični ležaji (s kosim dodirom)

Oznaka	$\frac{d}{mm}$	$\frac{D}{mm}$	$\frac{b}{mm}$	$\frac{r}{mm}$	Nosivost $\frac{C_0}{kN}$	Nosivost $\frac{C}{kN}$
Niz BG 32						
10 BG 32	10	30	14,0	1	4,55	6,95
12	12	32	15,9	1	5,6	7,8
15	15	35	15,9	1	5,6	7,8
17 BG 32	17	40	17,5	1,5	8,5	11
20	20	47	20,6	1,5	11	15,3
25	25	52	20,6	1,5	13,7	17,3
30 BG 32	30	62	23,8	1,5	20,4	25
35	35	72	27,0	2	28	33,5
40	40	80	30,2	2	32,5	38
45 BG 32	45	85	30,2	2	37,5	42,5
50	50	90	30,2	2	43	47,5
55	55	100	33,3	2,5	49	54
60 BG 32	60	110	36,5	2,5	63	66,5
65	65	120	38,1	2,5	69,5	71
70	70	125	39,7	2,5	71	71
75 BG 32	75	130	41,3	2,5	80	78
80	80	140	44,4	3	96,5	95
85	85	150	49,2	3	106	102
90 BG 32	90	160	52,4	3	127	118
95	95	170	55,6	3,5	150	137
100	100	180	60,3	3,5	160	146
Niz BF 33						
15 BG 33	15	42	19,0	1,5	9,3	13,7
17	17	47	22,2	1,5	12,9	18,6
20	20	52	22,2	2	14	18,6
25 BG 33	25	62	25,4	2	20	26
30	30	72	30,2	2	27	34,5
35	35	80	34,9	2,5	36	43
40 BG 33	40	90	36,5	2,5	45,5	55
45	45	100	39,7	2,5	56	65,5
50	50	110	44,4	3	73	80
55 BG 33	55	120	49,2	3	80	86,5
60	60	130	54,0	3,5	96,5	100
65	65	140	58,7	3,5	112	114
70 BG 33	70	150	63,5	3,5	129	132
75	75	160	68,3	3,5	140	137
80	80	170	68,3	3,5	160	156
85 BG 33	85	180	73,0	4	180	173
90	90	190	73,0	4	212	196
95	95	200	77,8	4	240	216
100 BG 33	100	215	82,6	4	265	236
105	105	225	87,3	4	300	255
110	110	240	92,1	4	320	275

Valjkasti ležaji (Nizovi RU, RN, RJ, RT, RA i RD-K)
(HRN M.C3.631/632/635/636/637/641/642 – 1966)

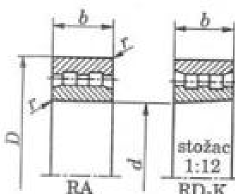


Niz RU: u oba smjera aksijalno pomični ležaji s vodećim vanjskim prstenom [1]

Niz RN: u oba smjera aksijalno pomični ležaji s vodećim unutarnjim prstenom [1]

Niz RJ: u jednom smjeru aksijalno pomični ležaji s vodećim vanjskim prstenom [1]

Niz RT: aksijalno nepomični ležaji [1]



Niz RA: u oba smjera aksijalno pomični dvoredni ležaji s vodećim vanjskim prstenom [1]

Niz RD-K: u oba smjera aksijalno pomični dvoredni ležaji s vodećim nutarnjim prstenom i stožastom rupom [1]

Jednoredni valjkasti ležaji

Oznaka	$\frac{d}{mm}$	$\frac{D}{mm}$	$\frac{b}{mm}$	$\frac{r}{mm}$	$\frac{r_1}{mm}$	Nosivost $\frac{C_0}{kN}$	Nosivost $\frac{C}{kN}$
Niz RU 10							
25 RU 10	25	47	12	1	0,5	7,5	10
30	30	55	13	1,5	0,8	10,4	13,2
35	35	62	14	1,5	0,8	13,2	16
40 RU 10	40	68	15	1,5	1	15,3	18,6
45	45	75	16	1,5	1	18,6	22,4
50	50	80	16	1,5	1	21,2	24
55 RU 10	55	90	18	2	1,5	24	27,5
60	60	95	18	2	1,5	24	28,5
65	65	100	18	2	1,5	26,5	29
70 RU 10	70	110	20	2	1,5	37,5	42,5
75	75	115	20	2	1,5	39	44
80	80	125	22	2	1,5	47,5	53
85 RU 10	85	130	22	2	1,5	55	58,5
90	90	140	24	2,5	2	60	65,5
95	95	145	24	2,5	2	63	68
100 RU 10	100	150	24	2,5	2	65,5	69,5
110	110	170	28	3	2	93	102
120	120	180	28	3	2	102	110

[1] Za sve nizove je $\alpha = 0$ (v. str. 674)

Jednoredni valjkasti ležaji *(nastavak)*

Oznaka	d mm	D mm	b mm	r mm	r_1 mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz RU 02							
20 RU 02	20	47	14	1,5	1	8	11,8
25	25	52	15	1,5	1	9,65	13,2
30	30	62	16	1,5	1	12,9	17,6
35 RU 02	35	72	17	2	1	18,6	25,5
40	40	80	18	2	2	24,5	33,5
45	45	85	19	2	2	27	34,5
50 RU 02	50	90	20	2	2	29	36,5
55	55	100	21	2,5	2	34,5	44
60	60	110	22	2,5	2,5	41,5	53
65 RU 02	65	120	23	2,5	2,5	49	62
70	70	125	24	2,5	2,5	52	64
75	75	130	25	2,5	2,5	61	75
80 RU 02	80	140	26	3	3	69,5	85
85	85	150	28	3	3	80	98
90	90	160	30	3	3	93	118
95 RU 02	95	170	32	3,5	3,5	110	137
100	100	180	34	3,5	3,5	122	153
Niz RU 03							
20 RU 03	20	52	15	2	1	10,6	16,6
25	25	62	17	2	2	15	22,4
30	30	72	19	2	2	20,4	30
35 RU 03	35	80	21	2,5	2	25	36
40	40	90	23	2,5	2,5	32,5	45,5
45	45	100	25	2,5	2,5	40	58,5
50 RU 03	50	110	27	3	3	51	71
55	55	120	29	3	3	58,5	85
60	60	130	31	3,5	3,5	72	102
65 RU 03	65	140	33	3,5	3,5	81,5	114
70	70	150	35	3,5	3,5	90	125
75	75	160	37	3,5	3,5	108	158
80 RU 03	80	170	39	3,5	3,5	118	160
85	85	180	41	4	4	129	180
90	90	190	43	4	4	153	208
95 RU 03	95	200	45	4	4	166	224
100	100	215	47	4	4	193	260
110	110	240	50	4	4	220	300
120	120	260	55	4	4	270	355

Nizovi RN 02, RJ 02 i RT 02 imaju iste izmjere i nosivosti po tablici kao niz RU 02.
Nizovi RN 03, RJ 03 i RT 03 imaju iste izmjere i nosivosti po tablici kao niz RU 03.

Jednoredni valjkasti ležaji *(nastavak)*

Oznaka	d mm	D mm	b mm	r mm	r_1 mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz RU 04							
30 RU 04	30	90	23	2,5	2,5	32	51
35	35	100	25	2,5	2,5	41,5	63
40	40	110	27	3	3	53	80
45 RU 04	45	120	29	3	3	60	90
50	50	130	31	3,5	3,5	73,5	112
55	55	140	33	3,5	3,5	81,5	118
60 RU 04	60	150	35	3,5	3,5	98	143
65	65	160	37	3,5	3,5	108	156
70	70	180	42	4	4	137	200
75 RU 04	75	190	45	4	4	160	232
80	80	200	48	4	4	183	265
85	85	210	52	5	5	208	305
90 RU 04	90	225	54	5	5	232	345
95	95	240	55	5	5	255	365
100	100	250	58	5	5	285	405
110 RU 04	110	280	65	5	5	320	455
120	120	310	72	6	6	355	500
Niz RU 22							
25 RU 22	25	52	18	1,5	1	13,2	16,6
30	30	62	20	1,5	1	19	23,2
35	35	72	23	2	1	28,5	35,5
40 RU 22	40	80	23	2	2	34,5	41,5
45	45	85	23	2	2	37,5	44
50	50	90	23	2	2	40,5	45,5
55 RU 22	55	100	25	2,5	2	47,5	54
60	60	110	28	2,5	2,5	62	71
65	65	120	31	2,5	2,5	75	85
70 RU 22	70	125	31	2,5	2,5	80	90
75	75	130	31	2,5	2,5	86,5	96,5
80	80	140	33	3	3	102	114
85 RU 22	85	150	36	3	3	118	132
90	90	160	40	3	3	134	153
95	95	170	43	3,5	3,5	163	183
100 RU 22	100	180	46	3,5	3,5	186	204
110	110	200	53	3,5	3,5	224	255
120	120	215	58	3,5	3,5	265	300

Nizovi RN 04, RJ 04 i RT 04 imaju iste izmjere i nosivosti po tablici kao niz RU 04.
Nizovi RJ 22 i RT 22 imaju iste izmjere i nosivosti po tablici kao niz RU 22.

Oznaka	d mm	D mm	b mm	r mm	r_1 mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz RU 23							
25 RU 23	25	62	24	2	2	23,2	31,5
30	30	72	27	2	2	28,5	37,5
35	35	80	31	2,5	2	34	44
40 RU 23	40	90	33	2,5	2,5	49	61
45	45	100	36	2,5	2,5	57	75
50	50	110	40	3	3	73,5	93
55 RU 23	55	120	43	3	3	83	108
60	60	130	46	3,5	3,5	106	132
65	65	140	48	3,5	3,5	110	143
70 RU 23	70	150	51	3,5	3,5	134	170
75	75	160	55	3,5	3,5	166	212
80	80	170	58	3,5	3,5	183	224
85 RU 23	85	180	60	4	4	196	245
90	90	190	64	4	4	220	270
95	95	200	67	4	4	255	310
100 RU 23	100	215	73	4	4	300	365
110	110	240	80	4	4	405	500
120	120	260	86	4	4	510	620
Niz RU 49							
10 RU 49	10	22	13	0,5		4,3	5,3
12	12	24	13	0,5		5,1	5,85
15	15	28	13	0,5		6,55	7,5
17 RU 49	17	30	13	0,5		6,55	7,5
20	20	37	17	0,5		12	13,7
22	22	39	17	0,5		12	13,7
25 RU 49	25	42	17	0,5		13,7	15
28	28	45	17	0,5		15,6	16,3
30	30	47	17	0,5		15,6	16,3
32 RU 49	32	52	20	1		22	24
35	35	55	20	1		24,5	26
40	40	62	22	1		31	32,5
45 RU 49	45	68	22	1		34,5	35,5
50	50	72	22	1		38	37,5
55	55	80	25	1,5		47,5	35,5
60 RU 49	60	85	25	1,5		52	49
65	65	90	25	1,5		76	51
70	70	100	30	1,5		78	73,5
75 RU 49	75	105	30	1,5		85	78
80	80	110	30	1,5		85	78
85	85	120	35	2		108	98
90 RU 49	90	125	35	2		116	104
95	95	130	35	2		116	104

Nizovi RJ 23 i RT 23 imaju iste izmjere i nosivosti po tablici kao niz RU 23.

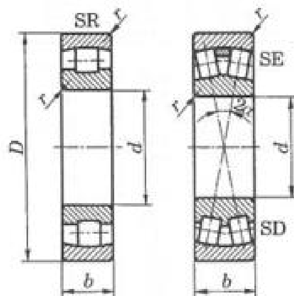
Dvoredni valjkasti ležaji

Oznaka	d mm	D mm	b mm	r mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz RA 49						
100 RA 49	100	140	40	2	104	98
105	105	145	40	2	108	100
110	110	150	40	2	110	102
120 RA 49	120	165	45	2	137	125
130	130	180	50	2,5	166	153
140	140	190	50	2,5	176	160
150 RA 49	150	210	60	3	224	208
160	160	220	60	3	236	216
170	170	230	60	3	245	220
180 RA 49	180	250	69	3	305	285
190	190	260	69	3	325	290
200	200	280	80	3,5	390	365
220 RA 49	220	300	80	3,5	415	380
240	240	320	80	3,5	455	400
260	260	360	100	3,5	640	600
280 RA 49	280	380	100	3,5	680	620
300	300	420	118	4	900	830
320	320	440	118	4	915	850
Niz RD 30 K [1]						
30 RD 30 K	30	55	19	1,5	21,2	25
35	35	62	20	1,5	26,5	31
40	40	68	21	1,5	34,5	39
45 RD 30 K	45	75	23	1,5	42,5	46,5
50	50	80	23	1,5	46,5	49
55	55	90	26	2	57	62
60 RD 30 K	60	95	26	2	63	65,5
65	65	100	26	2	67	67
70	70	110	30	2	83	85
75 RD 30 K	75	115	30	2	86,5	88
80	80	125	34	2	102	106
85	85	130	34	2	110	110
90 RD 30 K	90	140	37	2,5	129	132
95	95	145	37	2,5	134	134
100	100	150	37	2,5	140	137
110 RD 30 K	110	170	45	3	200	208
120	120	180	46	3	216	216
130	130	200	52	3	275	275
140 RD 30 K	140	210	53	3	285	285
150	150	225	56	3,5	335	325
160	160	240	60	3,5	337	365

[1] Niz RD 30 K ima stožastu rupu s stošcem 1:12. Vrijednosti za nutarnji promjer d odnose se na užu stranu rupe.

Bačvasti ležaji

Nizovi SR, SE i SD (HRN M.C3.651/655/657 – 1966)



Niz SR: jednoredni samopodesivi ležaji s radijalnim dodirom i vodećim nutarnjim prstenom ($\alpha = 0$, v. str. 674)

Niz SE: dvoredni samopodesivi ležaji s kosim dodirom i prstenastim uloškom

Niz SD: dvoredni samopodesivi ležaji s radijalnim dodirom i vodećim nutarnjim prstenom

Jednoredni bačvasti ležaji

Oznaka	d mm	D mm	b mm	r mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz SR 02						
25 SR 02	25	52	15	1,5	14,3	15
30	30	62	16	1,5	16,3	17,3
35	35	72	17	2	24,5	25
40 SR 02	40	80	18	2	30	30
45	45	85	19	2	32	32
50	50	90	20	2	38	37,5
55 SR 02	55	100	21	2,5	48	47,5
60	60	110	22	2,5	56	55
65	65	120	23	2,5	64	62
70 SR 02	70	125	24	2,5	73,5	71
75	75	130	25	2,5	78	75
80	80	140	26	3	90	85
85 SR 02	85	150	28	3	112	100
90	90	160	30	3	122	120
95	95	170	32	3,5	146	140
100 SR 02	100	180	34	3,5	160	156
110	110	200	38	3,5	208	196
120	120	215	40	3,5	228	216
130 SR 02	130	230	40	4	245	232
140	140	250	42	4	290	275
150	150	270	45	4	335	310

Oznaka	d mm	D mm	b mm	r mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz SR 03						
20 SR 03	20	52	15	2	14,6	16
25	25	62	17	2	20	21,6
30	30	72	19	2	28	30
35 SR 03	35	80	21	2,5	34,5	36,5
40	40	90	23	2,5	46,5	50
45	45	100	25	2,5	53	56
50 SR 03	50	110	27	3	68	71
55	55	120	29	3	78	81,5
60	60	130	31	3,5	96,5	100
65 SR 03	65	140	33	3,5	112	116
70	70	150	35	3,5	122	129
75	75	160	37	3,5	146	146
80 SR 03	80	170	39	3,5	163	166
85	85	180	41	4	183	186
90	90	190	43	4	204	212
95 SR 03	95	200	45	4	224	232
100	100	215	47	4	245	250
110	110	240	50	4	290	300
120 SR 03	120	260	55	4	345	355
130	130	280	58	5	400	400
140	140	300	62	5	475	475
150	150	320	65	5	530	540
Niz SR 04						
25 SR 04	25	80	21	2,5	34,5	36,5
30	30	90	23	2,5	46,5	48
35	35	100	25	2,5	53	58,5
40 SR 04	40	110	27	3	68	73,5
45	45	120	29	3	78	85
50	50	130	31	3,5	96,5	106
55 SR 04	55	140	33	3,5	112	120
60	60	150	35	3,5	122	129
65	65	160	37	3,5	146	150
70 SR 04	70	180	42	4	183	190
75	75	190	45	4	204	212
80	80	200	48	4	224	250
85 SR 04	85	210	52	5	255	280
90	90	230	54	5	270	310
95	95	240	55	5	290	335
100 SR 04	100	250	58	5	340	375
110	110	280	65	5	380	430

Dvoredni bačvasti ležaji

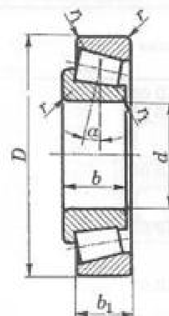
Oznaka	$\frac{d}{mm}$	$\frac{D}{mm}$	$\frac{b}{mm}$	$\frac{r}{mm}$	Nosivost $\frac{C_0}{kN}$	Nosivost $\frac{C}{kN}$
Niz SE 13						
20 SE 13	20	52	15	2	19	28,4
25	25	62	17	2	27	30,5
30	30	72	19	2	38	43
35 SE 13	35	80	21	2,5	45	49
40	40	90	23	2,5	60	63
45	45	100	25	2,5	78	76,5
50 SE 13	50	110	27	3	83	88
55	55	120	29	3	98	104
60	60	130	31	3,5	114	118
65 SE 13	65	140	33	3,5	137	140
70	70	150	35	3,5	156	160
75	75	160	37	3,5	176	180
80 SE 13	80	170	39	3,5	196	196
85	85	180	41	4	220	220
90	90	190	43	4	245	240
95 SE 13	95	200	45	4	265	260
100	100	215	47	4	310	300
105	105	225	49	4	340	325
110	110	240	50	4	375	360

Prema HRN M.C3.655 – 1966 normirani su još i dvoredni bačvasti ležaji (samopodesivi):

niz SD 22:	d =	25 ... 200 mm
	D =	52 ... 360 mm
	b =	18 ... 98 mm
niz SD 23:	d =	40 ... 200 mm
	D =	90 ... 420 mm
	b =	33 ... 138 mm
niz SD 30:	d =	110 ... 400 mm
	D =	170 ... 600 mm
	b =	45 ... 148 mm
niz SD 31:	d =	110 ... 360 mm
	D =	180 ... 600 mm
	b =	56 ... 192 mm
niz SD 32:	d =	90 ... 500 mm
	D =	160 ... 920 mm
	b =	52,4 ... 336 mm
niz SD 40:	d =	120 ... 360 mm
	D =	180 ... 540 mm
	b =	60 ... 180 mm
niz SD 41:	d =	110 ... 300 mm
	D =	180 ... 500 mm
	b =	69 ... 200 mm

Norme HRN za te ležaje ne propisuju nosivost C_0 i C.

Stožasti ležaji Niz KB (HRN M.C3.735 – 1966)



Niz KB: Stožasti ležaji podnose velika sastavljena (radijalna i aksijalna) opterećenja. Vanjski i nutarnji prsten mogu se montirati posebice.

Stožasti ležaji

Oznaka	$\frac{d}{mm}$	$\frac{D}{mm}$	$\frac{b}{mm}$	$\frac{b_1}{mm}$	$\frac{r}{mm}$	$\frac{r_1}{mm}$	Nosivost $\frac{C_0}{kN}$	Nosivost $\frac{C}{kN}$
Niz KB 02								
20 KB 02	20	47	14	12	1,5	0,5	12,9	18,3
25	25	52	15	13	1,5	0,5	15,6	19
30	30	62	16	14	1,5	0,5	20,8	26
35 KB 02	35	72	17	15	2	0,8	26,5	32,5
40	40	80	18	16	2	0,8	31	38
45	45	85	19	16	2	0,8	36	42,5
50 KB 02	50	90	20	17	2	0,8	40,5	46,5
55	55	100	21	18	2,5	0,8	52	56
60	60	110	22	19	2,5	0,8	56	62
65 KB 02	65	120	23	20	2,5	0,8	65,5	73,5
70	70	125	24	21	2,5	0,8	71	78
75	75	130	25	22	2,5	0,8	81,5	85
80 KB 02	80	140	26	22	3	1	88	96,5
85	85	150	28	24	3	1	106	114
90	90	160	30	26	3	1	120	127
95 KB 02	95	170	32	27	3,5	1,2	132	137
100	100	180	34	29	3,5	1,2	156	160
105	105	190	36	30	3,5	1,2	170	176
110 KB 02	110	200	38	32	3,5	1,2	196	196
120	120	215	40	34	3,5	1,2	216	220
130	130	230	40	34	4	1,5	232	240
140 KB 02	140	250	42	36	4	1,5	280	280
150	150	270	45	38	4	1,5	325	310

Stožasti ležaji *(konac)*

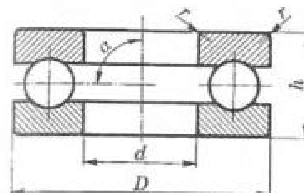
Oznaka	d mm	D mm	b mm	b_1 mm	r mm	r_1 mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz KB 03								
20 KB 03	20	52	15	13	2	0,8	16	22,4
25	25	62	17	15	2	0,8	21,6	30
30	30	72	19	16	2	0,8	28,5	37,5
35 KB 03	35	80	21	18	2,5	0,8	37,5	48
40	40	90	23	20	2,5	0,8	45	56
45	45	100	25	22	2,5	0,8	57	68
50 KB 03	50	110	27	23	3	1	67	78
55	55	120	29	25	3	1	78	90
60	60	130	31	26	3,5	1,2	91,5	108
65 KB 03	65	140	33	28	3,5	1,2	108	125
70	70	150	35	30	3,5	1,2	122	140
75	75	160	37	31	3,5	1,2	137	156
80 KB 03	80	170	39	33	3,5	1,2	153	173
85	85	180	41	34	4	1,5	170	193
90	90	190	43	36	4	1,5	190	212
95 KB 03	95	200	45	38	4	1,5	228	250
100	100	215	47	39	4	1,5	255	275
105	105	225	49	41	4	1,5	270	290

Oznaka	Širina b mm	Širina b_1 mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN	Oznaka	Širina b mm	Širina b_1 mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz KB 22 [1]					*Niz* KB 23 [2]				
30 KB 22	20	17	27,5	32	20 KB 23	21	18	22,8	29
35	23	19	36,5	43	25	24	20	32	40
40	23	19	40,5	47,5	30	27	23	43	52
45 KB 22	23	19	46,5	52	35 KB 23	31	23	54	64
50	23	19	48	53	40	33	27	67	75
55	25	21	63	67	45	36	30	81,5	90
60 KB 22	28	24	76,5	80	50 KB 23	40	33	102	110
65	31	27	93	98	55	43	35	120	127
70	31	27	93	98	60	46	37	140	146
75 KB 22	31	27	102	104	65 KB 23	48	39	160	170
80	33	28	116	120	70	51	42	183	190
85	36	30	137	137	75	55	45	212	216
90 KB 22	40	34	166	163	80 KB 23	58	48	236	240
95	43	37	186	186	85	60	49	275	275
100	46	39	212	208	90	64	53	315	315
105 KB 22	50	43	245	240	95 KB 23	67	55	345	345
110	53	46	275	260	100	73	60	405	390
120	58	50	340	305	105	77	63	450	430

[1] Promjeri d i D te polumjeri r i r_1 isti su kao kod odgovarajućih veličina niza KB 02.

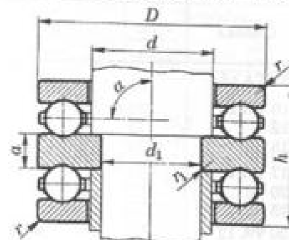
[2] Promjeri d i D te polumjeri r i r_1 isti su kao kod odgovarajućih veličina niza KB 03.

Aksijalni kuglični ležaji Nizovi TA i TDC (HRN M.C3.701/705 – 1966)



TA

Niz TA: jednoredni aksijalni kuglični ležaji (podnose aksijalna opterećenja u jednom smjeru).



TDC

Niz TDC: dvoredni aksijalni kuglični ležaji (podnose aksijalna opterećenja u oba smjera).

Jednoredni aksijalni kuglični ležaji

Oznaka	d mm	D mm	h mm	r mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz TA 11						
10 TA 11	10	24	9	0,5	11,4	5,7
12	12	26	9	0,5	12,5	6,1
15	15	28	9	0,5	13,7	6,5
17 TA 11	17	30	9	0,5	16	7,2
20	20	35	10	0,5	22	9,65
25	25	42	11	1	29	12,2
30 TA 11	30	47	11	1	32,5	13,2
35	35	52	12	1	39	14,6
40	40	60	13	1	52	19,6
45 TA 11	45	65	14	1	57	20,8
50	50	70	14	1	62	22,4
55	55	78	16	1	76,5	27
60 TA 11	60	85	17	1,5	93	32
65	65	90	18	1,5	96,5	33,5
70	70	95	18	1,5	104	34,5
75 TA 11	75	100	19	1,5	112	36,5
80	80	105	19	1,5	116	37,5
85	85	110	19	1,5	125	39
90 TA 11	90	120	22	1,5	156	50
100	100	135	25	1,5	220	69,5
110	110	145	25	1,5	236	73,5

Jednoredni aksijalni kuglični ležaji (*nastavak*)

Oznaka	d mm	D mm	h mm	r mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz TA 12						
10 TA 12	10	26	11	1	14	7,2
12	12	28	11	1	15,6	7,8
15	15	32	12	1	20,4	9,5
17 TA 12	17	35	12	1	22	10
20	20	40	14	1	31	14
25	25	47	15	1	41,5	18
30 TA 12	30	52	16	1	48	19,6
35	35	62	18	1,5	64	26,5
40	40	68	19	1,5	76,5	30,5
45 TA 12	45	73	20	1,5	86,5	32,5
50	50	78	22	1,5	91,5	34,5
55	55	90	25	1,5	132	49
60 TA 12	60	95	26	1,5	146	53
65	65	100	27	1,5	156	55
70	70	105	27	1,5	163	57
75 TA 12	75	110	27	1,5	173	58,5
80	80	115	28	1,5	180	61
85	85	125	31	1,5	220	72
90 TA 12	90	135	35	2	270	86,5
100	100	150	38	2	340	108
110	110	160	38	2	375	114
Niz TA 13						
25 TA 13	25	52	18	1,5	51	22,8
30	30	60	21	1,5	65,5	28
35	35	68	24	1,5	86,5	36
40 TA 13	40	78	26	1,5	112	45
45	45	85	28	1,5	134	53
50	50	95	31	2	166	63
55 TA 13	55	105	35	2	204	76,5
60	60	110	35	2	220	81,5
65	65	115	36	2	236	85
70 TA 13	70	125	40	2	280	98
75	75	135	44	2,5	325	112
80	80	140	44	2,5	355	116
85 TA 13	85	150	49	2,5	405	132
90	90	155	50	2,5	405	132
100	100	170	55	2,5	490	156
110 TA 13	110	190	63	3	585	180
120	120	210	70	3,5	720	216
130	130	225	75	3,5	780	232
140 TA 13	140	240	80	3,5	930	260
150	150	250	80	3,5	1000	270
160	160	270	87	4	1200	320

Jednoredni aksijalni kuglični ležaji (*konac*)

Oznaka	d mm	D mm	h mm	r mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz TA 14						
25 TA 14	25	60	24	1,5	73,5	33,5
30	30	70	28	1,5	104	44
35	35	80	32	2	127	53
40 TA 14	40	90	36	2	170	68
45	45	100	39	2	200	78
50	50	110	43	2,5	250	95
55 TA 14	55	120	48	2,5	300	108
60	60	130	51	2,5	360	127
65	65	140	56	3	405	140
70 TA 14	70	150	60	3	455	153
75	75	160	65	3	510	170
80	80	170	68	3,5	560	183
85 TA 14	85	180	72	3,5	620	196
90	90	190	77	3,5	680	212
100	100	210	85	4	880	260
110 TA 14	110	230	95	4	1020	290
120	120	250	102	5	1100	310
130	130	270	110	5	1460	380
140 TA 14	140	280	112	5	1460	380
150	150	300	120	5	1630	415
160	160	320	130	6	2000	480

Dvoredni aksijalni kuglični ležaji

Oznaka	d mm	d_1 mm	D mm	h mm	a mm	r mm	r_1 mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz TDC 22									
15 TDC 22	15	10	32	22	5	1	0,5	20,4	9,5
20	20	15	40	26	6	1	0,5	31	14
25	25	20	47	28	7	1	0,5	41,5	18
30 TDC 22	30	25	52	29	7	1	0,5	48	19,6
35	35	30	62	34	8	1,5	0,5	64	26,5
40	40	30	66	36	9	1,5	1	76,5	30,5
45 TDC 22	45	35	73	37	9	1,5	1	86,5	32,5
50	50	40	78	39	9	1,5	1	91,5	34,5
55	55	45	90	45	10	1,5	1	132	49
60 TDC 22	60	50	95	46	10	1,5	1	146	53
65	65	55	100	47	10	1,5	1	156	55
70	70	55	105	47	10	1,5	1,5	163	57
75 TDC 22	75	60	110	47	10	1,5	1,5	173	58,5
80	80	65	115	48	10	1,5	1,5	180	61
85	85	70	125	55	12	1,5	1,5	220	72
90 TDC 22	90	75	135	62	14	2	1,5	270	86,5
100	100	85	150	67	15	2	1,5	340	108
110	110	95	160	67	15	2	1,5	375	114
120 TDC 22	120	100	170	68	15	2	2	390	118
130	130	110	190	80	18	2,5	2	510	150
140	140	120	200	81	18	2,5	2	540	156
Niz TDC 23									
25 TDC 23	25	20	52	34	8	1,5	0,5	51	22,8
30	30	25	60	38	9	1,5	0,5	65,5	28
35	35	30	68	44	10	1,5	0,5	86,5	36
40 TDC 23	40	30	78	49	12	1,5	1	112	45
45	45	35	85	52	12	1,5	1	134	53
50	50	40	95	58	14	2	1	166	63
55 TDC 23	55	45	105	64	15	2	1	204	76,5
60	60	50	110	64	15	2	1	220	81,5
65	65	55	115	65	15	2	1	236	85

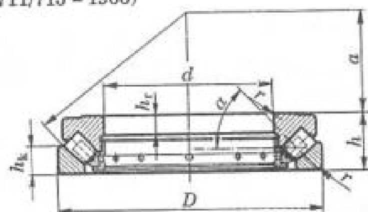
Dvoredni aksijalni kuglični ležaji (*konac*)

Oznaka	d mm	d_1 mm	D mm	h mm	a mm	r mm	r_1 mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz TDC 23									
70 TDC 23	70	55	125	72	16	2	1,5	280	98
75	75	60	135	79	18	2,5	1,5	325	112
80	80	65	140	79	18	2,5	1,5	355	116
85 TDC 23	85	70	150	87	19	2,5	1,5	405	132
90	90	75	155	88	19	2,5	1,5	405	132
100	100	85	170	97	21	2,5	1,5	490	156
110 TDC 23	110	95	190	110	24	3	1,5	585	180
120	120	100	210	123	27	3,5	2	720	216
130	130	110	225	130	30	3,5	2	780	232
140 TDC 23	140	120	240	140	31	3,5	2	930	260
150	150	130	250	140	31	3,5	2	1 000	275
160	160	140	270	153	33	4	2	1 200	320
Niz TDC 24									
25 TDC 24	25	15	60	45	11	1,5	1	73,5	33,5
30	30	20	70	52	12	1,5	1	104	44
35	35	25	80	59	14	2	1	127	53
40 TDC 24	40	30	90	65	15	2	1	170	68
45	45	35	100	72	17	2	1	200	78
50	50	40	110	78	18	2,5	1	255	95
55 TDC 24	55	45	120	87	20	2,5	1	300	108
60	60	50	130	93	21	2,5	1	360	127
65	65	50	140	101	23	3	1,5	405	140
70 TDC 24	70	55	150	107	24	3	1,5	455	153
75	75	60	160	115	26	3	1,5	510	170
80	80	65	170	120	27	3,5	1,5	560	183
85 TDC 24	85	65	180	128	29	3,5	2	620	196
90	90	70	190	135	30	3,5	2	680	212
100	100	80	210	150	33	4	2	880	260

Aksijalni bačvasti ležaji
Nizovi TS i TSA (HRN M.C3.711/715 - 1966)

Niz TS: samopodesivi aksijalni ležaji s nesimetričnim bačvastim valjčićima.

Niz TSA: samopodesivi aksijalni ležaji sa simetričnim bačvastim valjčićima.



Aksijalni bačvasti ležaji

Oznaka	d mm	D mm	h mm	h_r mm	h_k mm	a mm	r mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz TS 92									
200 TS 92	200	280	48	15	24	108	3	1 140	425
220	220	300	48	15	24	117	3	1 250	430
240	240	340	60	19	30	130	3,5	1 800	630
260 TS 92	260	360	60	19	30	139	3,5	1 860	640
280	280	380	60	19	30	150	3,5	2 000	680
300	300	420	73	21	38	162	4	2 450	850
320 TS 92	320	440	73	21	38	172	4	2 600	880
340	340	460	73	21	38	183	4	2 700	915
360	360	500	85	25	38	194	5	3 250	1 160
380 TS 92	380	520	85	27	42	202	5	3 800	1 270
400	400	540	85	27	42	212	5	4 050	1 320
420	420	580	95	30	46	225	6	4 900	1 600
440 TS 92	440	600	95	30	46	235	6	5 000	1 660
460	460	620	95	30	46	245	6	5 200	1 660
480	480	650	103	33	55	259	6	5 700	1 900
500	500	670	103	33	55	268	6	6 000	1 930
Niz TS 93									
100 TS 93	100	170	42	14	20,8	58	2,5	585	280
110	110	190	48	16	23	64	3	750	345
120	120	210	54	18	26	70	3,5	950	430
130 TS 93	130	225	58	19	28	76	3,5	1 080	490
140	140	240	60	20	29	82	3,5	1 250	550
150	150	250	60	20	29	87	3,5	1 290	570
160 TS 93	160	270	67	23	32	92	4	1 500	655
170	170	280	67	23	32	96	4	1 560	670
180	180	300	73	25	35	103	4	1 860	800
190	190	320	78	27	38	110	5	2 160	930
200 TS 93	200	340	85	29	41	116	5	2 800	1 060
220	220	360	85	29	41	125	5	2 550	1 080
240	240	380	85	29	41	135	5	2 650	1 120
260	260	420	95	32	45	148	6	3 600	1 460

Oznaka	d mm	D mm	h mm	h_r mm	h_k mm	a mm	r mm	Nosivost C_0 kN	Nosivost C kN
Niz TS 93									
280 TS 93	280	440	95	32	46	158	6	3 750	1 500
300	300	480	109	37	50	168	6	4 500	1 800
320	320	500	109	37	53	180	6	4 750	1 830
340TS 93	340	540	122	41	59	192	6	5 600	2 200
360	360	560	122	41	59	202	6	5 850	2 240
380	380	600	132	44	63	216	8	7 100	2 700
400 TS 93	400	620	132	44	64	225	8	7 350	2 800
420	420	650	140	48	68	235	8	7 650	2 900
440	440	680	145	49	70	245	8	8 500	3 250
460 TS 93	460	710	150	51	72	257	8	9 500	3 550
480	480	730	150	51	72	270	8	9 650	3 600
500	500	750	150	51	74	280	8	10 200	3 650
Niz TS 94									
60 TS 94	60	130	42	15	20	38	2,5	404	232
65	65	140	45	16	21	42	3	520	275
70	70	150	48	17	23	44	3	570	300
75 TS 94	75	160	51	18	24	47	3	670	345
80	80	170	54	19	26	50	3,5	720	375
85	85	180	58	21	28	54	3,5	830	425
90 TS 94	90	190	60	22	29	56	3,5	965	490
100	100	210	67	24	32	62	4	1 160	585
110	110	230	73	26	35	69	4	1 370	680
120 TS 94	120	250	78	29	37	74	5	1 600	780
130	130	270	85	31	41	81	5	1 860	915
140	140	280	85	31	41	86	5	2 000	950
150 TS 94	150	300	90	32	44	92	5	2 280	1 080
160	160	320	95	34	45	99	6	2 600	1 220
170	170	340	103	37	50	104	6	2 900	1 370
180 TS 94	180	360	109	39	52	110	6	3 250	1 530
190	190	380	115	41	55	117	6	3 600	1 660
200	200	400	122	43	59	122	6	4 050	1 860
220	220	420	122	43	59	132	8	4 250	1 900
240 TS 94	240	440	122	43	59	142	8	4 500	1 960
260	260	480	132	48	64	154	8	5 500	2 360
280	280	520	145	52	68	166	8	6 400	2 800
300	300	540	145	52	70	175	8	6 400	2 800

Normirani su (HRN M.C3.715 - 1966) još i sljedeći nizovi aksijalnih bačvastih ležaja:

niz TSA 92: d = 240 ... 500 mm, D = 340 ... 670 mm,

niz TSA 93: d = 120 ... 500 mm, D = 210 ... 750 mm,

niz TSA 94: d = 60 ... 300 mm, D = 130 ... 540 mm.

Norme HRN za te nizove ležaja ne propisuju nosivosti C_0 i C.

Nosivost valjnih ležaja (prema ISO)

Statička nosivost ležaja (HRN M.C3.851 – 1963).

Statička nosivost je nosivost u mirovanju, tj. radijalno odnosno aksijalno (centrično) opterećenje radijalnih odnosno aksijalnih ležaja pri kojem nastaje ukupna plastična deformacija od 10^{-4} promjera valjnog tijela.

Proračun statičke nosivosti (HRN M.C3.853 ... 856 – 1965).

Statička nosivost C_0 za pojedine vrste ležaja predočena je u tablicama (str. 657 do 673)

Ekvivalentno statičko opterećenje F_0 ovisno je o radijalnom opterećenju F_r i aksijalnom opterećenju F_a.

a) *Ekvivalentno statičko opterećenje za radijalne ležaje*

– pri čistom radijalnom opterećenju ($F_a = 0$)

$$F_0 = F_r$$

– uz istodobno radijalno i aksijalno opterećenje – uzimamo veću od sljedećih dviju vrijednosti

$$F_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a \qquad F_0 = F_r$$

Vrijednosti za X_0 i Y_0

Vrsta radijalog ležaja	Jednoredni ležaji		Dvoredni ležaji	
	X_0	Y_0	X_0	Y_0
Kuglični ležaji s radijalnim dodirom	0,6	0,5	0,6	0,5
Kuglični ležaji s kosim dodirom				
$\alpha = 20°$	0,5	0,42	1	0,84
$\alpha = 25°$	0,5	0,38	1	0,76
$\alpha = 30°$	0,5	0,33	1	0,66
$\alpha = 35°$	0,5	0,29	1	0,58
$\alpha = 40°$	0,5	0,26	1	0,52
Samopodesivi kuglični ležaji	0,5	0,22 cot α	1	0,44 cot α
Valjkasti ležaji	0,5	0,22 cot α	1	0,44 cot α

b) *Ekvivalentno statičko opterećenje za aksijalne ležaje*

– istodobno aksijalno i radijalno opterećenje[1)]

$$F_0 = F_a + 2{,}3\, F_r \tan \alpha$$

(Za jednoredne aksijalne ležaje ta jednadžba više ne vrijedi točno ako je $F_r > 0{,}44\, F_a \cot \alpha$.)

*

Statička nosivost C_0 ne smije biti manja od ekvivalentnog statičkog opterećenja F_0

$$C_0 \geq F_0$$

[1)] α je kut dodira (kut između dodirne osi i okomice na os ležajngo provrta).

Dinamička nosivost ležaja (HRN M.C3.852 – 1963)

Trajnost valjnog ležaja određena je brojem okretaja (ili radnim satima uz stalnu brzinu vrtnje) pri kojem se pojavljuju prvi znakovi umora tvari.

Nazivno trajanje skupine jednakih ležaja je onaj broj okretaja (ili radnih sati uz stalnu brzinu vrtnje) što ga dostigne ili premaši 90 % ležaja iz te skupine prije pojave prvih znakova umora tvari.

Dinamička nosivost radijalnog odnosno aksijalnog ležaja je čisto radijalno odnosno aksijalno stalno opterećenje kojim možemo opteretiti skupinu jednakih ležaja s nazivnim trajanjem od 10^6 okretaja.

Proračun dinamičke nosivosti (HRN M.C3. 857/858/759/860 – 1964)

Dinamička nosivost C za pojedine vrste ležaja predočena je u tablicama (str. 657 do 673).

a) *Ekvivalentno dinamičko opterećenje* F pri radijalnom opterećenju F_r i aksijalnom opterećenju F_a – *za aksijalne ležaje*

$$F = V \cdot X R_r + Y F_a$$

pri čemu faktor V iznosi:

Vrsta radijalnog ležaja	Unutarnji prsten	
	se okreće	miruje
kuglični ležaji		
– s radijalnim dodirom	1	1,2
– s kosim dodirom	1	1,2
– samopodesivi	1	1
– jednoredni s radijalnim dodirom, rastavljivi	1	1
valjkasti ležaji	1	1,2

Vrijednsti X i Y za radijalne kuglične ležaje s radijalnim dodirom

$\frac{F_a}{C_0}$	e	Jednoredni ležaji $F_a/V F_r > e$		Dvoredni ležaji $F_a/V F_r \leq e$		Dvoredni ležaji $F_a/V F > e$	
		X	Y	X	Y	X	Y
0,014	0,19		2,30				2,30
0,028	0,22		1,99				1,99
0,056	0,26		1,71				1,71
0,084	0,28		1,55				1,55
0,11	0,30	0,56	1,45	1	0	0,56	1,45
0,17	0,34		1,31				1,31
0,28	0,38		1,15				1,15
0,42	0,42		1,04				1,04
0,56	0,44		1,00				1,00

Za rastavljive jednoredne radijalne kuglične ležaje s radijalnim dodirom vrijedi

$$F_a/V\,F_r > 0{,}2 \quad \begin{cases} X = 0{,}25 \\ Y = 2{,}5 \end{cases}$$

Vrijednosti X i Y za radijalne kuglične ležaje s kosim dodirom

α	$i\,\dfrac{F_a}{C_0}$ [1]	e	Jednoredni ležaji $F_a/V\,F_r > e$		Dvoredni ležaji $F_a/V\,F_r \le e$		Dvoredni ležaji $F_a/V\,F_r > e$	
			X	Y	X	Y	X	Y
5°	0,014	0,23	Za e, X i Y vrijednosti su iste kao kod kugličnih ležaja s radijalnim dodirom (str. 677)		1	2,78	0,78	3,74
	0,028	0,26				2,40		3,23
	0,056	0,30				2,07		2,78
	0,085	0,34				1,87		2,52
	0,11	0,36				1,75		2,36
	0,17	0,40				1,58		2,13
	0,28	0,45				1,39		1,87
	0,42	0,50				1,26		1,69
	0,56	0,52				1,21		1,63
10°	0,014	0,29	0,46	1,88	1	2,18	0,75	3,06
	0,029	0,32		1,71		1,98		2,78
	0,057	0,36		1,52		1,76		2,47
	0,86	0,38		1,41		1,63		2,29
	0,11	0,40		1,34		1,55		2,18
	0,17	0,44		1,23		1,42		2,00
	0,29	0,49		1,10		1,27		1,79
	0,43	0,54		1,01		1,17		1,64
	0,57	0,54		1,00		1,16		1,63
15°	0,015	0,38	0,44	1,47	1	1,65	0,72	2,39
	0,029	0,40		1,40		1,57		2,28
	0,058	0,43		1,30		1,46		2,11
	0,087	0,46		1,23		1,38		2,00
	0,12	0,47		1,19		1,34		1,93
	0,17	0,50		1,12		1,26		1,82
	0,29	0,55		1,02		1,14		1,66
	0,44	0,56		1,00		1,12		1,63
	0,58	0,56		1,00		1,12		1,63
20°	–	0,57	0,43	1,00	1	1,09	0,70	1,63
25°		0,68	0,41	0,87		0,92	0,67	1,41
30°		0,80	0,39	0,76		0,78	0,63	1,24
35°		0,95	0,37	0,66		0,66	0,60	1,07
40°		1,14	0,35	0,57		0,55	0,57	0,93

[1] i broj redova kuglica u jednom ležaju.

Vrijednosti X i Y za samopodesive radijalne ležaje

Vrsta radijalnog ležaja	$F_a/V\,F_r \le 1{,}5\tan\alpha$		$F_a/V\,F_r > 1{,}5\tan\alpha$	
	X	Y	X	Y
Samopodesivi kuglični ležaji				
– jednoredni	–	–	0,40	0,4 cot α
– dvoredni	1	0,42 cot α	0,65	0,65 cot α
Samopodesivi valjkasti ležaji				
– jednoredni	1	0	0,4	0,4 cot α
– dvoredni	1	0,45 cot α	0,67	0,67 cot α

Za $\alpha = 0 : F_a = 0, \quad X = 1$

b) *Ekvivalentno dinamičko opterećenje* F pri radijalnom opterećenju F_r i aksijalnom opterećenju F_a – *za aksijalne ležaje*

$$F = X\,F_r + Y\,F_a$$

Vrijednosti X i Y

Vrsta aksijalnog ležaja	e	Jednosmjerni ležaji $F_a/F_r > e$		Dvosmjerni ležaji $F_a/F_r \le e$		Dvosmjerni ležaji $F_a/F_r > e$	
		X	Y	X	Y	X	Y
Kuglični ležaji s kosim dodirom							
$\alpha = 45°$	1,25	0,66	1	1,18	0,59	0,66	1
$\alpha = 60°$	2,17	0,92	1	1,90	0,54	0,92	1
$\alpha = 75°$	4,67	1,66	1	3,89	0,52	1,66	1
Samopodesivi valjkasti ležaji	1,5 tan α	tan α	1	1,5 tan α	0,67	tan α	1

Za $\alpha = 90° : F_r = 0, \quad Y = 1$

*

Trajnost ležaja L ovisi o dinamičkoj nosivosti C i ekvivalentnom opterećenju F te iznosi

$$L = \left(\frac{C}{F}\right)^m \qquad (10^6 \text{ okretaja})$$

pri čemu je eksponent m:

za kuglične ležaje $\quad m = 3$

za valjkaste ležaje $\quad m = 10/3$

U praksi se trajnost ležaja obično računa u radnim satima.

MAZIVA

S obzirom na *izvor maziva* razlikujemo sljedeće vrste:

Mineralna ulja se najčešće rabe kao maziva u tehnici. Dobivamo ih destilacijom iz sirovog zemnog ulja (nafte). Većinu destilata treba još i rafinirati. Rafinati su skuplji, no ujedno i trajniji te imaju dobru mazivost ako nisu previše rafinirani.

Biljna i životinjska ulja (koštano, ricinusovo, repičino ulje) veoma su masna i bolje mazivosti od mineralnih, ali se pri uporabi pretvaraju djelomice u smolu i razgrađuju. Stoga se vrlo rijetko rabe posve sama.

Zamašćena (kompaundirana) ulja mješavina su mineralnih i biljnih ili životinjskih ulja. Zato je njihova mazivost osobito dobra, ali brže stare nego čista mineralna ulja.

Mineralna ulja s dodatcima (aditivima) imaju bolja svojstva od čistih mineralnih. Dodatci se rabe za poboljšanje mazivosti i viskoznosti, sprječavaju autooksidaciju, koroziju, pjenjenje i rđanje, te omogućuju detergentno djelovanje i mazanje pri visokom tlaku. Tzv. »detergenti–disperzanti« osobito su nužni za motorna ulja, jer sprječavaju nakupljanje taloga i izgorjelih čestica u motoru.

Neka sintetska ulja (silikoni i sl.) sve se više rabe u suvremenoj tehnici zbog iznimnih svojstava.

Masti (za strojeve i valjne ležaje) su smjese sapuna i mineralnih ulja. Uglavnom razlikujemo litijeve i natrijeve masti; poznat je, međutim, cijeli niz posebnih masti izrađenih npr. na temelju aluminijeva ili drugog sapuna. Natrijeve masti tvore s vodom emulziju pa izdrže više temperature.

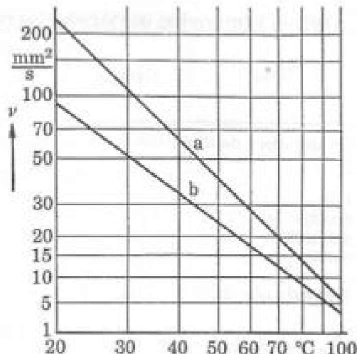
Kakvoću maziva i mazivost prosuđujemo s obzirom na vlaženje i prianjanje na kovinske površine i otpornost prema starenju. Pri izboru maziva za određenu svrhu odlučujuća su fizikalna i kemijska svojstva: gustoća, viskoznost, plamište, krutište, kapljište, neutralizacijski broj i ostalo.

Gustoća pri 15 °C gotovo je za sva ulja manja od 1 000 kg/m^3. Kvalitetna stabilna ulja na parafinskom temelju imaju gustoću približno 870 kg/m^3, naftna imaju nešto veću, a ulja s asfaltnim temeljem još veću gustoću. Sintetska ulja iz ugljenog katrana dosežu gustoću 1 100 ... 1 200 kg/m^3. Općenito su gustoća i viskoznost tim manje što ugljikovodici, od kojih je sastavljeno neko mineralno ulje, sadrže više vodika.

Viskoznost je najvažniji podatak pri izboru ulja za određenu svrhu.

Vrijednosti za viskoznost (kinematičku) su na str. 87. Viskoznost veoma ovisi o temperaturi te se s porastom temperature znatno smanjuje.

Za ležaje s velikom brzinom vrtnje i malim opterećenjem potrebno je ulje manje viskoznosti. Za veća opterećenja i pri višim pogonskim temperaturama (npr. u vrućim prostorijama) potrebno je ulje veće viskoznosti, a za promjenljive pogonske prilike potrebno je ulje s blago položenom krivuljom viskoznosti. Te temeljne upute valja uskladiti s uvjetima koji ukupno odlučuju o konačnom izboru najpravilnijeg maziva.



Dijagram ovisnosti viskoznosti ν o temperaturi T
a poluteško (srednje) ulje
b lako ulje

Plamište je temperatura pri kojoj se uljne pare prvi put zapale kad im se približavamo s otvorenim plamenom. Ako ulje nastavi samo gorjeti, dosegli smo *gorište*, koje je 30 do 40 °C više od plamišta. Plamište moramo uzeti u obzir samo ako su pogonske temperature blizu plamišta. Ono veoma ovisi o tlaku; pri povećanom tlaku (npr. u kompresorima) plamište je znatno više, dok je pri sniženom tlaku (npr. u vakuumskim pumpama) znatno niže.

Kapljište je temperatura na kojoj se pojavi prva kap tekuće masti kad se ona zagrijava u određenoj posudi. Mnoge se masti razgrađuju već mnogo prije nego dosegnu kapljište, pa stoga ono mora biti znatno više od pogonske temperature ležaja.

Krutište je temperatura pri kojoj ulje više ne teče. Time ocjenjujemo uporabljivost ulja pri niskim temperaturama.

Penetracijom se iskazuje tvrdoća masti (tj. dubina do koje se, uz određene uvjete, u uzorak masti utisne stožac određenih izmjera).

Neutralizacijski broj. Zbog uporabe ulja pri višim temperaturama i katalitičkog djelovanja kovina u nazočnosti kisika iz zraka, u mineralnim se i zamašćenim uljima stvaraju nakon duljeg vremena slobodne organske kiseline, pa ulje »stari«. Neutralizacijski broj jest broj mg kalijeva hidroksida (KOH) potrebnog za neutralizaciju slobodne organske kiseline u 1 g ulja.

*

Kako laboratorijska ispitivanja spomenutih fizikalnih i kemijskih značajki nisu uvijek dovoljna za ocjenu radnih svojstava, uvedena su i ispitivanja za posebna maziva i neposredno na strojevima, a osobito na motorima s unutarnjim izgaranjem. Ispituje se odn. ocjenjuju sljedeća svojstva: sposobnost prianjanja i debljina sloja maziva na plohama, oksidacijska stabilnost, detergentnost i dr. Te su metode obično normirane.

Ležajna, vretenska, osovinska i cirkulacijska ulja

Vrsta	Oznaka	Viskoznost ν mm²/s	Krutište $t_{kr\,max}$ °C	Plamište $t_{pl\,min}$ °C
Ležajno ulje – destilat (HRN B.H3.313 ... 316 – 1956)				
		pri 50°C		
lako	LD-30	21 ... 38	–5	140
srednje	LD-45	40 ... 52	–5	150
poluteško	LD-60	55 ... 75	0	160
teško	LD-100	80 ... 110	0	170
Vretensko ulje (HRN B.H3.300/301 – 1956) – za protočno mazanje				
		pri 20 °C		
lako	VL	20 ... 45	–15	130
teško	VT	60 ... 85	–15	130
Vretensko ulje – destilat (HRN B.H3.310/311 – 1956) – za protočno mazanje				
lako				
teško				
Osovinsko ulje (HRN B.H3.321/323 – 1956) – za osovine tračničkih vozila				
		pri 50 °C		
lako	OL	45 ... 60	–15	150
teško	OT	90 ... 110	0	160
Cirkulacijsko ulje (HRN B.H3.230 – 1973) – za optočno mazanje				
		pri 50 °C		
super super lako	CP 2	1,6	–40	80
super lako	CP 3	3	–30	90
ekstra ekstra lako	CP 7	7	–20	110
ekstra lako	CP 9	9	–20	140
posebno lako	CP 14	14	–16	160
vrlo lako	CP 20	20	–15	165
lako	CP 27	27	–15	170
srednje	CP 37	37	–10	180
teško	CP 50	50	–10	200
vrlo teško	CP 75	75	–10	200
osobito teško	CP 100	100	–5	210
ekstra teško	CP 150	150	–5	215
ekstra ekstra teško	CP 215	215	–5	220
super teško	CP 300	300	–5	230
super super teško	CP 425	425	–5	230

Ulje za visoki tlak, zupčanike i zupčane prigone

Oznaka	Viskoznost −17,8 °C ν mm²/s	Viskoznost 50 °C ν mm²/s	Viskoznost 98,9 °C ν mm²/s	Krutište $t_{kr\,max}$ °C	Plamište $t_{pl\,min}$ °C
Ulje za visoki tlak (HRN B.H3.211 ... 215 – 1962)					
UVP-75 [1]	3 268	22 ... 29		–20	150
UVP-80 [1]		53 ... 76	8,5 ... 12	–15	165
UVP-90 [2]		91 ... 190	14,2 ... 25,1	–12	180
UVP-140 [2]			25,1 ... 42,9	–10	200
UVP-250 [3]			42,9	0	220
Ulje za otvorene zaupčanike (HRN B.H3.270 ... 272 – 1955)					
OZ 5			33	–	190
OZ 10			72	–	190
OZ 15			125	–	190
Ulje za zatvorene zupčane prigone (HRN B.H3.319 – 1973)					
ZU 40		40		–25	180
ZU 55		55		–20	190
ZU 80		80		–18	200
ZU 110		110		–15	210
ZU 150		150		–12	220
ZU 190		190		–12	230
ZU 230		230		–10	235
ZU 305		305		–5	240
ZU 455		455		–5	240
Ulje za mehaničke prigone motornih vozila (HRN B.H3.302/303 – 1973)					
MP 4-80	< 23 000		9 ... 11,5	–20	170
MP 4-90	–		16,8 ... 19,2	–15	190
MP 4-140	–		25,5 ... 31,5	–8	210
MP 5-75	< 3 300		> 4,2	–	150
MP 5-80	< 11 000		9 ... 11,5	(–25)	160
MP 5-90	< 76 000		16,8 ... 19,2	(–18)	180
MP 5-140	–		25,5 ... 31,5	(–7)	200

[1] Za zupčane prigone.
[2] Za mjenjače i diferencijale.
[3] Za pužne prigone.

Hidrauličko, kompresorsko, turbinsko i cilindarsko ulje

Vrsta	Oznaka	Viskoznost $\frac{\nu}{mm^2/s}$	Krutište $\frac{t_{kr\ max}}{°C}$	Plamište $\frac{t_{pl\ min}}{°C}$
Hidrauličko ulje (HRN B.H3.120 ... 128 – 1963) za uljno-hidrauličke naprave				
		pri 50 °C		
ekstra ekstra lako	HU-EEL	10 ... 12	–35	81
ekstra lako	HU-EL	12 ... 14	–30	100
vrlo lako	HU-VL	17 ... 21	–25	160
lako	HU-L	20 ... 34	–20	200
srednje	HU-S	38 ... 42	–15	210
teško	HU-T	49 ... 53	–10	220
vrlo teško	HU-VT	61 ... 75	–10	230
posebno teško	HU-NT	80 ... 95	–10	240
Kompresorsko ulje (HRN B.H3.151 ... 156 – 1962) – za stapne i rotacijske kompresore				
		pri 50 °C		
lako	KU-L	35 ... 50	–20	175
srednje	KU-S	52 ... 72	–15	185
teško	KU-T	75 ... 105	–10	195
vrlo teško	KU-VT	110 ... 140	–5	215
posebno teško	KU-NT	150 ... 200	–5	230
ekstra teško	KU-ET	220 ... 270	–5	250
Ulje za rashladne kompresore (HRN B.H3.141 ... 144 – 1962) – za kompresore za HN_3, CO_2, freone i sl.				
		pri 50 °C		
vrlo lako	KH-VL	10 ... 17	–40	135
lako	KH-L	18 ... 26	–35	160
srednje	KH-S	26 ... 36	–25	180
teško	KH-T	36 ... 50	–20	200
Turbinsko ulje (HRN B.H3.210 – 1976) – za vodne, parne i plinske turbine				
		pri 50 °C		
vrlo lako	TU-VL	16 ... 24	–10	180
lako	TU-L	25 ... 33	–8	190
srednje	TU-S	34 ... 42	–8	210
teško	TU-T	44 ... 52	–8	220
Cilindarsko ulje (HRN B.H3.341 – 1956, 382 – 1970) – za parne cilindre				
		pri 100 °C		
za zasićenu paru	CU 250	30 ... 52	+5	250
za pregrijanu paru	CU 300	44 ... 55	+5	310

Motorno ulje (HRN B.H3.129/139/149/169 – 1974)

Razdioba mineralnih motornih ulja po kakvoći

Klasifikaciju API su (1970/71) zajednički izdali: API (American Petroleum Institute) i ASTM (American Society for Testing Materials)

Kakvoća po HRN	Klasifikacija API [1]	Značajka ulja	Uporaba	
A	SB	inhibirano	laki	benzinski motori
B	SD	inhibirano detergentno	teži	benzinski motori
C	CC	jače detergentno	laki	dizelski-motori
D	CD	jako detergentno	teži	dizelski-motori

Za dvotaktne benzinske motore motorno ulje je s dodatcima, a rabi se pomiješano s benzinom.

Razdioba po viskoznosti

Po SAE (Society of Automotive Engineers) motorna su ulja podijeljena u gradacije po viskoznosti (pri čemu nisu uzeti u obzir ni kakvoća ulja, ni ovisnost njegove viskoznosti o temperaturi).

Gradacija po SAE	Viskoznost –17,8 °C $\frac{\nu}{mm^2/s}$	Viskoznost 98,9 °C $\frac{\nu}{mm^2/s}$	Krutište $\frac{t_{kr\ max}}{°C}$	Plamište $\frac{t_{pl\ min}}{°C}$
Zimska ulja				
SAE 10 Z	2 400	5,4 ... 7,3	–25	200
SAE 20 Z	9 600	7,3 ... 9,6	–20	205
Ljetna ulja				
SAE 20	–	7,3 ... 9,6	–20	205
SAE 30	–	9,6 ... 12,9	–15	220
SAE 40	–	12,9 ... 16,8	–10	230
SAE 50	–	16,8 ... 22,7	–10	240

»Svesezonska ulja« obuhvaćaju viskoznošću više gradacija. (Ulje koje odgovara gradacijama SAE 10 Z i SAE 30, označeno je sa SAE 10 Z-30).

[1] Klasifikacija API poznaje još i kakvoće: SA, SC i SE (od SA do SE s porastom dodatka) te CA i CB (od CA do CD za povećani stupanj kompresije motora).

Vazelinsko, izolacijsko ulje i ulje za obradbu

Vrsta	Oznaka	Viskoznost $\frac{\nu}{mm^2/s}$	Krutište $\frac{t_{kr\,max}}{°C}$	Plamište $\frac{t_{pl\,min}}{°C}$
Vazelinsko ulje, tehničko (HRN B.H3.160 ... 163 – 1958) – za precizne instrumente i lake radilice				
vrlo lako	VZT-VL	pri 20 °C 20 ... 37	−25	120
		pri 50 °C		
lako	VZT-L	12 ... 17	−20	120
srednje	VZT-S	18 ... 25	−15	140
teško	VZT-T	26 ... 42	−15	160
Izolacijsko ulje (HRN B:H3.561/562 – 1970)				
za transformatore	IU-T	pri −30 °C 1 800; pri 20 °C 30	−45	130
za sklopke	IU-P	pri −15 °C 800; pri 20 °C 40	−30	140

Dielektrična čvrstoća izolacijskih ulja IU-T i IU-P iznosi: za neprerađeno ulje 30 kV, za prerađeno ulje 50 kV.

Ulja i tekućine za obradbu – za hlađenje i podmazivanje alata pri odvajanju čestica s kovina

Neemulgirajuća ulja (HRN B.H3.526 – 1973)

		pri 50 °C		
neaktivna ulja	N 5	3,0 ... 6,5	−20	90
	N 10	6,5 ... 12	−20	100
	NEP	12 ... 37,5	−10	140
	NVEP	12 ... 37,5	−10	160
aktivna ulja	A 10	6,5 ... 12	−20	100
	A 25	12 ... 37,5	−10	140
	VA	12 ... 37,5	−10	140

Emulgirajuća ulja i sintetične tekućine (HRN B.H3.536– 1974) – za emulzije s vodom u omjeru ulje/voda 1 : 10 ... 1 : 40 (1:60), otopine u vodi u omjeru koncentrat/voda = 1:50 ... 1:1000.

Masti za mazanje

Vrsta	Oznaka	Viskoznost 50 °C $\frac{\nu}{mm^2/s}$	Penetracija (po gnječenju)	Krutište $\frac{t_{kr\,max}}{°C}$	Kapljište $\frac{t_{ks\,min}}{°C}$
Masti za otvorene zupčanike (HRN B.H3.273/274 – 1955)					
teška	OZ-20	–	310 ... 340	–	–
vrlo teška	OZ-41	–	290 ... 310	–	–
Masti za visoki tlak i temperaturu – za klizne i valjane ležaje pri povišenim temperaturama i tlakovima (HRN B.H3.624 – 1974)					
vrlo meka	MVP-1	–	310 ... 340	–	175
meka	MVP-2	–	265 ... 295	–	180
srednja	MVP-3	–	220 ... 250	–	185
– za visoke temperature (HRN B.H3.644/648 – 1965)					
tvrda	MVT-4	–	175 ... 205	–	160
briketna	MVT-B	–	< 80	–	180
Masti na temelju Li sapuna (HRN B.H3.634 – 1974) – za više namjena					
vrlo meka	VM-1	> 40	310 ... 340	−15	175
meka	VM-2	> 40	265 ... 295	−15	180
srednja	VM-3	> 40	220 ... 250	−15	185
Masti na temelju Na sapuna (HRN B.H3.645 – 1974) – za valjne ležaje					
meka	MKL-2	> 35	265 ... 295	−15	140
srednja	MKL-3	> 35	220 ... 250	−15	150
Grafitirana mast (HRN B.H3.661 – 1970)					
srednja	LMG-3	> 37	200 ... 250	−15	95
Sadrži: 2 ... 4 % grafita, 8 % pepela, 2 % vode.					
Masti s molibdenovim disulfidom MoS_2 (HRN B.H3.666 – 1976)					
–	MMo-1	> 40	310 ... 340	−15	175
–	MMo-2	> 40	265 ... 295	−15	180
Sadrži: > 3% MoS_2.					
Antikorozijski vazelin (HRN B.H3.681 – 1977)					
–	AV-55	–	200 ... 325	–	55
–	AV-65	–	90 ... 150	–	65
–	AV-75	–	30 ... 80	–	75

Izbor maziva [1)]

Mjesto i način podmazivanja	Pogonski uvjeti t – temperatura (°C) n – brzina vrtnje (min^{-1})	Maziva po HRN
Ležaji		
Klizni ležaji		
– podmazivanje uljem, ručno ili mazalicama	$n < 50$ $n = 50 ... 200$ $n = 200 ... 700$	LD 100 LD 60 LD 45
– podmazivanje uljem, cirkulacijsko ili prstenom	$t > 0$ °C: $n < 50$ $n = 50 ... 200$ $n = 200 ... 700$ $n = 700 ... 1\,500$ $n = 1\,500 ... 3\,000$ $n > 3\,000$ $t < 0$ °C	 CP-100 CP-75 CP-50 CP-37 CP-20 CP-7 KH-S
– podmazivanje mašću	$t > 60$ °C: mazalicama tlačno $t < 60$°C	 LMG-3 MVP-2 MKL-3
Valjni ležaji		
– podmazivanje uljem	$t = -25 ... 40$ °C $t = 0 ... 60$ °C: $n < 700$ $n = 700 ... 3\,000$ $n > 3\,000$ $t = 60 ... 90$ °C: $n < 700$ °C $n = 700 ... 3\,000$ $n > 3\,000$ $t > 90$ °C: $n < 700$ $n = 700 ... 3\,000$ $n > 3\,000$	KH-T CP-37 CP-20 CP-7 CP-100 CP-37 CP-20 CP-300 CP-215 CP-75
– podmazivanje mašću	$t = -20 ... 125$ °C: normalno opterećenje veliko opterećenje	 VM-3 MVP-3

1) Navedene su upute obavještajne. U pojedinim slučajevima, a napose pri većim zahtjevima, valja uzeti u obzir upute proizvođača stroja ili uređaja i proizvođača maziva.

Izbor maziva (*nastavak*)

Mjesto i način podmazivanja	Pogonski uvjeti t – temperatura (°C) n – brzina vrtnje pogonskog zupčanika (min^{-1}) P – prenesena snaga (kW)	Maziva po HRN
Zupčani prijenosi		
Zatvoreni zupčanici	$t = -20 ... 20$ °C: veliko opterećenje manje opterećenje	 ZU-80 ZU-40
– podmazivanje cirkulacijsko	$t = 0 ... 70$ °C: $n < 350$: $P < 18$ $P = 18 ... 65$ $P > 65$ $n = 350 ... 1\,000$: $P < 11$ $P = 11 ... 50$ $P > 50$	 ZU-55 ZU-80 ZU-190 ZU-40 ZU-55 ZU-80
– podmazivanje u uljnoj kupelji	$n < 350$: $P < 18$ $P = 18 ... 65$ $P > 65$ $n = 350 ... 1\,000$: $P < 11$ $P = 11 ... 50$ $P > 50$	 ZU-80 ZU-190 ZU-305 ZU-55 ZU-80 ZU-190
– podmazivanje cirkulacijsko ili u uljnoj kupelji	$n = 1\,000 ... 2\,500$: $P < 7$ $P = 7 ... 37$ $P > 37$ $n = 2\,500 ... 5\,000$: $P < 4$ $P = 4 ... 15$ $P > 15$	 ZU-40 ZU-55 ZU-80 CP-20 ZU-40 ZU-55
Otvoreni zupčanici	$t < 60$ °C	OZ-15
Pužni prijenosi	t – normalne – niske	MP4-140 MP4-80
Lanci i užad		
Gallovi lanci	t – normalne – niske	MP4-90 KH-T
Čelična užad	t – normalne i niske	OZ-5

Mjesto i način podmazivanja	Pogonski uvjeti t – temperatura (°C) n – brzina vrtnje (min^{-1}) P_1 – snaga po cilindru (kW)	Maziva po HRN
Vodne turbine		
Potporni ležaji		
– sa čvrstim potpornim prstenom	$t < 50$ °C srednja i velika opterećenja, mala i srednja brzina	TU-T
– s pomičnim segmentima	$t < 60$ °C: optrećenje < 3,5 N/mm^2	TU-S
Horizontalni potporni i grebenasti ležaji	mala opterećenja, velika brzina	TU-S
Svornjaci statorskih lopatica, vodivi podvodni ležaji	$t < 15$ °C mala i srednja opterećenja	LMG-3
Glavine Kaplanovih turbina	servomotor u osovini servomotor u glavini	CP-300 TU-S
Parne turbine		
Ležaji	$n > 3\,000$ $n = 1\,500 \ldots 3\,000$	TU-VL TU-S
Stapni parni strojevi		
Cilindri	Temperatura pare: $t_p < 320$ °C $t_p < 260$ °C	CU- 300 CU-250
Dizelski motori (stabilni)		
Vertikalni motori – cilindri i ležaji	$P_1 < 120$ kW $P_1 < 120$ kW	D-SAE 30 D-SAE 40
Horizotalni motori – cilindri i ležaji	$P_1 < 40$ kw $P_1 < 40$ kW	D-SAE 20Z D-SAE 30
Regulatori		
Protočni regulatori Tlačni regulatori	t – normalne t – normalne – niske	TU-S TU-S DH-L
Stapni kompresori za regulatore	$t > 10$ °C $t < 10$ °C	KU-T KU-S

Mjesto i način podmazivanja	Pogonski uvjeti t – konačna temperatura kompresije (°C) P – tlak (bar)	Maziva po HRN
Hidraulički strojevi		
Stapne pumpe Rotacijske pumpe	normalno opterećenje normalno opterećenje veliko opterećenje	HU-VL HU-S HU-VT
Stapni kompresori		
Cilindri i brtve		
– mali jednostupanjski zračni kompresor	$p < 6$ bar: vani – zimi – ljeti unutra	KU-L KU-S KU-S
– višestupanjski kompesor za zrak, N_2, CO, NH_3, C_2H i sl.	$p < 100$ bar: $t < 140$ °C $t < 160$ °C $t < 190$ °C $t > 190$ °C	KU-S KU-T KU-NT KU-ET
– kompresori za koksni ili rasvjetni plin	$t < 140$ °C $t > 140$ °C	KU-S KU-T
– kompresori za metan, propan, butan	$t < 140$ °C	KU-T
– kompresori za vlažni zrak ili plin	$t < 135$ °C $t > 135$ °C	KU-S KU-VT
– rashladni kompresori za NH_3 i CO_2 za freon i CH_3Cl za SO_2		KH-S KH-T KH-T
Ležaji i pogonski mehanizam – cirkulacijsko podmazivanje – tlačno podmazivanje		CP-75 CP-50
Rotacijski kompresori		
jednostupanjski	$p < 2{,}5$ bar $t < 140$ °C $p > 2{,}5$ bar: $t < 180$ °C $t > 180$ °C	KU-S KU-VT KU-ET
dvostupanjski	$p < 8$ bar $t < 140$ °C $p > 8$ bar: $t < 180$ °C $t > 180$ °C	KU-S KU-VT KU-ET
Alatni strojevi		
Vodila	malo opterećenje veliko opterećenje	LD-30 LD-60



Shell

VODEĆI SVJETSKI PROIZVOĐAČ MAZIVA

Maziva za najčešću industrijsku primjenu

SHELL	Viskoznost (ISO VG)	Primjena	Međunarodna oznaka
MOTORNA ULJA			
RIMULA TX	SAE 15W-40	Teško opterećeni četverotaktni diesel motori.	ACEA E2
HIDRAULIČKA ULJA			
TELLUS S	22, 32, 46,68, 100	Alatni strojevi, preše, dizalice.	HLP
TELLUS T	15, 32, 46, 68, 100	Ulje visokog indeksa viskoznosti. Za hidrauličke sustave izložene značajnim promjenama temperature.	HVLP
AEROSHELL FLUID 41		Hidrauličko ulje za ekstremno niske temperature.	
NATURELLE HF R	32	Biorazgradljivo hidrauličko ulje.	HVLP
CIRKULACIJSKA I STROJNA ULJA			
MORLINA	5, 10, 100	Cirkulacijski sustavi, vretena te lako opterećeni hidraulički sustavi i zupčanici.	HL, CL VCL
VITREA	32, 46, 68, 100, 150, 220, 320, 460	Cirkulacijski sustavi, lako opterećeni zupčanici, ležajevi, lančanici i sl.	C
TONNA S	68, 220	Klizne staze i vodilice alatnih strojeva.	CGLP
ZUPČANIČKA ULJA			
OMALA	68, 100, 150, 220, 320, 460, 680	EP ulje za teško i udarno opterećene industrijske prijenosnike uz najviši stupanj zaštite od trošenja.	CLP
TIVELA WA / WB	150, 220	Sintetičko ulje za visokoopterećene zupčanike.	
KOMPRESORSKA ULJA			
COMPTELA S	46, 68	Ulja za vijčane i krilne zračne kompresore.	VCL
CORENA P	68, 100, 150	Ulja za klipne termički visokoopterećene zračne kompresore.	VDL
ULJA ZA RASHLADNE KOMPRESORE			
CLAVUS	32, 46, 68	Radni medij: amonijak.	KA
CLAVUS G	32, 46, 68, 100	Radni medij: amonijak, R12, R22, R403, halogenizirani ugljikovodici.	KA/KC
CLAVUS R	46	Radni medij: R23, R134A, R404A, R404B, R407C.	
SD REFRIGERATOR (22 12)	39	Radni medij: R12, R22, R131B, R113, R114, R403, R502.	KC

SHELL	Viskoznost	Primjena	Međunarodna oznaka
TURBINSKA ULJA			
TURBO S	ISO VG 32, 46	Parne i plinske turbine kod kojih se s istim uljem podmazuju i zupčasti prijenosnici.	L-TD
TURBO T	ISO VG 32, 46, 68, 100	Za podmazivanje i upravljanje plinskih i parnih turbina, te turbokompresora.	L-TD
IZOLACIJSKA ULJA			
DIALA B, BX, D, DX G, GX		Transformatori i električne sklopke.	
ULJE ZA PNEUMATSKE ALATE			
TORCULA	ISO VG 32, 100	Sve vrste pneumatskih alata.	
ULJE ZA PRIJENOS TOPLINE			
THERMIA B	31 cSt (40 °C)	Temeprature ulja do 320 °C.	
ULJA ZA OBRADBU KOVINA - EMULZIJE			
KS FLUID U	460 cSt (40 °C)	Tokarenje, glodanje , brušenje, bušenje.	
KS FLUID E	60 cSt (40 °C)	Brušenje.	
ULJA ZA OBRADBU KOVINA - ČISTA REZNA ULJA			
MACRON B	18,3 cSt (40 °C)	Rezanje i tokarenje obojenih kovina.	
MACRON MX	30 cSt (40 °C)	Tokarenje, glodanje, rezanje navoja, provlačenje čelika i obojenih kovina.	
MACRON H	5,4 cSt (40 °C)	Brušenje, honanje, lepanje lijevanog željeza, kovina i stakla.	
MEDICINSKA BIJELA ULJA			
ONDINA	ISO VG 15, 46,68	Podmazivanje strojnih dijelova gdje je moguć slučajan kontakt s hranom.	
CASSIDA FLUID HF	ISO VG 32, 46, 68, 100	Hidraulički sistemi, i ležajevi u prehrambenoj industriji.	USDA H1
MASTI			
MASTI	NLGI		Ugušćivač
ALVANIA EP	0, 1, 2	Višenamjenska mast za industrijsku primjenu.	Li
STAMINA EP	2	Visokotemperaturna mast.	poliurea
CASSIDA RLS	2	Mast za prehrambenu industriju sa sintetičkim baznim uljem.	Al complex

TEHNOLOGIJA

Lijevanje

Modeli po kojima se izrađuju kalupi za lijevanje dijele se na:

Višekratno uporabive modele kovinske izradbe (čelik, sivi lijev aluminij, mjed itd.), polimera, drveta ili sadre. Moraju biti rastavljivi i s kosim bočnim plohama da ih nakon kalupljenja možemo izvući iz pješčanog kalupa.

Jezgrenici su modeli za izradbu pješčanih jezgara.

Jednokratno uporabivi modeli izrađuju se od voska (kojega po konačnoj izradbi pješčanog kalupa rastalimo zagrijavanjem) ili od polimera (UF ili pjenastoga PS koji pri dodiru s vrućom talinom ispare).

Temelj za izradbu modela je konstrukcijski nacrt. Pri izmjeravanju modela valja uzeti u obzir stezanje lijeva pri skrućivanju i ohlađivanju. Stoga su izmjere modela za nadmjeru povećane s obzirom na konstrukcijski nacrt.

Nadizmjere lijevova
(HRN K.H5.050 - 1959)

Lijev	Nadizmjera %	
	manji odljevci	veći odljevci
sivi lijev	1,0	0,75
nodularni lijev		
- nežareni	2,0	1,5
- žareni	0,5	0,3
temperirani lijev		
- nežareni	2,0	2,0
- bijeli, žareni	1,6	-
- crni, žareni	0,5	0,5
čelični lijev	2,0	1,8
lijevani Mn čelici	2,3	2,3
lijevana bronca	1,5	1,3
lijevana Al bronca	2,1	1,8
lijevana mjed	1,7	1,5
cinčani lijev	1,5	1,2
aluminijski lijev	1,2	1,0
- Al-Mg lijev } - Al-Cu-Mg lijev	1,5	1,3
magnezijski lijev	1,4	1,3
bijela kovina	0,5	-

Na plohama, koje će biti obrađene, treba na modelu za obradbu dodati:

Najveća izmjera odljevka mm	Dodatak za obradbu [1] u mm					
	sivog lijeva		za odljevke od čeličnog lijeva		neželjeznih kovina	
	I	II	I	II	I	II
... 200	2 ... 3	3 ... 5	3 ... 4	6 ... 7	2 ... 2	3 ... 4
200) ... 300	2 ... 3	5 ... 6	3 ... 4	7 ... 9	2 ... 2	4 ... 5
300) ... 500	3 ... 4	6 ... 8	4 ... 5	9 ... 12	3 ... 3	5 ... 6
500) ... 800	3 ... 5	7 ... 9	4 ... 7	10 ... 13	3 ... 4	5 ... 7
800) ... 1 200	4 ... 6	8 ... 10	6 ... 9	12 ... 15	4 ... 5	6 ... 8
1 200) ... 1 800	5 ... 7	9 ... 11	7 ... 10	14 ... 16	4 ... 5	7 ... 9
1 800) ... 2 600	6 ... 8	10 ... 12	9 ... 12	15 ... 18	5 ... 6	8 ... 10
2 600) ... 3 800	-	11 ... 14	-	16 ... 21	-	9 ... 11
3 800) ... 5 400	-	12 ... 16	-	18 ... 24	-	10 ... 13
5 400)...	-	14 ... 18	-	24 ... 30	-	12 ... 16

[1] I - pri mnogobrojnoj izradbi odljevka, II - pri pojedinačnoj izradbi

Zbog veće preglednosti pri izradbi kalupa i upozorenja za koji je lijev predviđen pojedini model (nadizmjere!) označuju se pojedine plohe na modelima posebnim bojama.

Boje modela

Površine modela i jezgrenika	Lijev					
	sivi	nodularni	temperirani	čelični	lake kovine	teške kovine
površine koje ostaju neobrađene	crveno	ljubičasto	sivo	modro	zeleno	žuto
površine koje će se obraditi	žute crte [1]	žute crte [1]	žute crte [1]	žute crte [1]	žute crte [1]	crvene crte [1]
mjesta za hladila i uložene trnove	modro	crveno	crveno	crveno	crveno	modro
sastavci dijeljenih modela	crni rub					
jezgreni oslonci	crno					

Modeli nisu potrebni pri posebnom načinu lijevanja (tlačnom, kokilnom, centrifugalnom, kontinuiranom itd.).

Kalupi su pomoćno sredstvo u kojima se uljevena kovinska talina hlađenjem skrućuje u odljevak.

Kalupi moraju izdržati visoke temperature talina, ne smiju s njom reagirati, moraju biti i kod tih temperatura dovoljno čvrsti i porozni za odvođenje nastalih plinova. Razlikujemo:

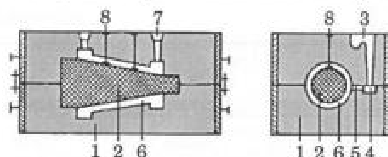
Kalupe za jednokratnu uporabu, koje izrađujemo nabijanjem ljevačkog pijeska. Ljevački pijesak sastoji se uglavnom od kremenih zrnaca (SiO_2), ima visoko talište (1720 °C) te postaje gnjecav tek iznad 1600 °C. Veličina zrna kreće se između 0,06 ... 0,5 mm (u ovisnosti od tražene glatkoće ploha odljevka i njegove veličine). Kremenova zrna sama su sipka. Vežemo ih dodatkom veziva. Najuobičajenije vezivo je glina (2 ... 30 %) uz dodatak vlage (5 ... 11 %). Po količini gline u ljevačkom pijesku razlikujemo suhi, polumasni i masni pijesak. Suhi pijesak ima najveću propusnost za plinove, ali manju čvrstoću. Rabimo ga npr. za jezgre (do 5 % gline). Polumasni pijesak rabimo za svježe kalupe, a masni - najveće čvrstoće - za sušene kalupe. Osim posebnih vrsta anorganskih veziva (gline s određenim mješavinom Al_2O_3 i SiO_2 uz dodatke K, Mg i sl.) rabimo i organska veziva (uljna, škrobna, polimerna - PF, UF i sl.), posebno pri izradbi jezgara i ljevačkih maski (za velike serije malih odljevaka - po Croningu).

Kalupljenje može biti ručno (pri pojedinačnoj izradbi odljevaka i pri velikim odljevcima) ili strojno (pri višebrojnoj izradbi manjih odljevaka).

[1] Manje se plohe oboje tom bojom u cjelini.

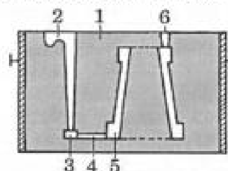
Pješčani kalupi

Dvodjelni kalup za model višekratne uporabe:



1 – kalup
2 – jezgra
3 – ulijevak
4 – razvodnik
5 – privodnik
6 – odljevak
7 – pojilo
8 – jezgreni oslonac

Kalup za model (od polimera) jednokratne uporabe:



1 – kalup
2 – ulijevak
3 – razvodnik
4 – privodnik
5 – odljevak
6 – pojilo (odušnik)

U pojilu (koje mora biti dovoljno veliko pri punim, debelim odljevcima) mora se talina održati tekućom (toplinskom izolacijom ili dodatnim zagrijavanjem) sve do skrućenja odljevka, da bi se spriječilo stvaranje lunkera u odljevku.

Za odvod zraka valja namjestiti na najvišim mjestima modela odušnike, koji mogu također preuzeti ulogu pojila. Pijesak u kalupu valja na mjestima probosti (zračnici), kako bi pri ulijevanju nastalim plinovima olakšali izlaz.

Pri dvodjelnom okviru za kalup moramo gornji dio čvrsto spojiti s donjim dijelom, da se ne bi dignuo zbog hidrostatskog uzgona. Da uzgon u talini ne bi iskrivio ili srušio jezgre, učvršćujemo ih osloncima i opteretnim utezima.

Kalup za višekratnu uporabu je kovinske, grafitne ili keramičke izradbe.

Kokile su kovinski kalupi (obično od čelika ili sivog lijeva) pomoću kojih se izrađuju vrlo točni odljevci (s tolerancijom ± 0,3 ... ± 0,05 mm). U jednodjelnim kokilama su i jezgre kovinske, u dvodjelnim kokilama su pješčane jezgre.

Talina se ulijeva u kokile otvorenim mlazom.

Zbog više cijene rabimo kokile u višebrojnoj izradbi odljevaka. Zbog velikih temperaturnih opterećenja njihova primjena je ograničena na izradbu odljevaka od slitina nižeg tališta (Sn, Zn, Pb, Al, Mg, mjedi).

Centrifugalno lijevanje, pri kojem se talina zbog rotacije kokile zbije uz vanjsku njenu stijenku, prikladno je za izradbu lijevanih prstena i cijevi.

Pri neprekidnom lijevanju kovinska se talina ulijeva u obostrano otvorenu kokilu (zatvorenu samo pri početku postupka). Talina se u kokili

skrućuje do nastanka dovoljno čvrste vanjske kore, koja omogućuje izvlačenje odljevka. Postupak je prikladan za neprekidno lijevanje punih ili šupljih profila (u duljinama koje ograničava samo izmjera i raspored radnih prostorija).

Dozvoljeno odstupanje izmjera neobrađenih odljevaka od sivog i čeličnog lijeva

Preporučene smjernice (za izmjere bez propisanih tolerancija i za odljevke u pješčane kalupe). – Izmjere u mm.

Nazivna izmjera	Sivi lijev				Čelični lijev			
	kalupljenje [1]				kalupljenje [1]			
	ručno		strojno		ručno		strojno	
	vel.	deblj.	vel.	deblj.	vel.	deblj.	vel.	deblj.
... 6	+2 −1,5	+1,5	±1	±1				
6) ... 10		±2,5		±2	+3 −2	±3	+3 −2	±2
10) ... 18						±4		
18) ... 30		±3,5	+2 −1,5	±2,5	+4 −2	±5		±3
30) ... 50						±7	+4 −2	
50) ... 80	+3 −2	±4,5	+2,5 −1,5	±3,5	+5 −3	±8		±4
80) ... 120					+6 −3	±9	+5 −3	
120) ... 180					+7 −4	±11		±5
180) ... 250					+8 −4	±12	+7 −4	±6
250) ... 315	+4 −3		+3 −2		+9 −4	±13		
315) ... 400					+10 −5	±15	+8 −4	±7
400) ... 500	+6 −4		+4,5 −2,5			±16		±8
500) ... 630					+11 −6		+9 −5	
630) ... 800	+7 −5		+5 −3		+12 −6			
800) ... 1 000					+13 −7		+11 −6	
1 000) ... 1 250	+10 −7		+6 −4		+15 −8			
1 250) ... 1 600					+16 −8		+14 −7	
1 600) ... 2 000	+13 −9		+8 −5		+18 −9			
2 000) ... 2 500					+20 −10			

[1] vel. – odstupanje veličine odljevka (promjer, širina, duljina): deblj. – odstupanja debljine stijenki.

Dozvoljena odstupanja izmjera za neobrađene odljevke neželjeznih kovina

Preporučene smjernice (za izmjere bez propisanih tolerancija i za odljevke u pješčanim kalupima). – Izmjere u mm.

Nazivna izmjera	Odljevci teških kovina				Odljevci lakih kovina			
	kalupljenje [1]				kalupljenje [1]			
	ručno		strojno		ručno		strojno	
	vel.	deblj.	vel.	deblj.	dij.	jez.	dij.	jez.
... 6		±1,5		±1	±1,2	±1,6	±0,6	±0,8
6) ... 10	±1,5	+2 −1,5		+1,5 −1	±1,6	±2,3	±1,2	±1,5
10) ... 18		+2,5 −1,5	±1,5	+2 −1,5	±2	±3	±1,8	±2,2
18) ... 30	±2	+3 −2		±2	jedn.	sast.	jedn.	sast.
30) ... 50	±2,5	+3,5 −2,5	±2	+2,5 −2	±1	±1,6	±0,8	±1
50) ... 80		+4,5 −3		+3 −2	±1,2	±1,9	±0,9	±1,2
80) ... 120	±3,5	+5 −4	±3		±1,4	±2,2	±1,1	±1,4
120) ... 180					±1,6	±2,5	±1,2	±1,6
180) ... 250					±1,8	±2,9	±1,4	±1,8
250) ... 315	±4		±3,5		±2	±3,2	±1,6	±2
315) ... 400					±2,2	±3,6	±1,8	±2,2

Čišćenje odljevaka – postupak:

- istresanje pijeska obavlja se ručno ili strojno (vibratorima)
- grubim čišćenjem odstranjuje se sav pijesak i to ručno i/ili strojno (pneumatskim dlijetima, u okretnim bubnjevima, pjeskarenjem kremenim ili čeličnim zrncima – pneumatskim ili mehaničkim bacačima, vodenim mlazom – 25 ... 150 bar)
- priljevci (ulijevci i pojila) odstranjuju se piljenjem, plinskim ili elektro lučnim rezanjem, brusnom pločom
- brušenjem se poravnavaju plošne neravnine nakon odstranjenja priljevaka i sl.

Eventualne grješke odljevaka popravljaju se isjecanjem ili zavarivanjem.

[1] vel. – za veličinu odljevka; deblj. – za debljinu stijenki; dij. – za dvodjelne kalupe; jez. – za kalupe s jezgrama; jedn. – za jednodjelne kalupe; sast. – za sastavljene kalupe.

Oblikovanje deformiranjem

Oblikovanje deformiranjem – preoblikovanje – radni je postupak u kojem krutoj kovinskoj tvari (sirovom odljevku ili već prije preoblikovanom poluproizvodu, npr. limu) plastičnom (trajnom) deformacijom promijenimo oblik, pri čemu se ujedno može promijeniti i struktura tvari.

Preoblikovanje se zbiva u području prisilnog tečenja kovine ili slitine. S obzirom na temperaturu preoblikovanja razlikujemo:

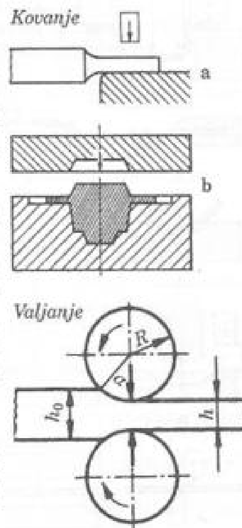
– preoblikovanje u hladnom stanju, tj. ispod temperature rekristalizacije, pri čemu tvar očvrsne (povećavaju se čvrstoća i tvrdoća uz smanjenje istezljivosti)

– preoblikovanje u toplom stanju, iznad temperature rekristalizacije, pri čemu tvar ne očvrsne.

Rastom deformacije rastu i naprezanja u tvari. Pri prevelikoj deformaciji tvar se kida. Stoga je veličina deformacije pri preoblikovanju ograničena. Naprezanja, koja nastaju zbog očvršćivanja pri preoblikovanju u hladnom stanju, mogu se žarenjem odstraniti, nakon čega se tvar može dalje preoblikovati. Na taj način možemo postupnim preoblikovanjem i međužarenjem postići vrlo velike deformacije tvari.

Značajna je brzina deformacije. Pri malenoj brzini deformacije tvar će se prognječiti do u dubinu presjeka, pri velikoj brzini stići će deformacija samo do manjih dubina.

Najznačajniji su primjeri preoblikovanja:



Kvalitetne dijelove složenih oblika i s velikim razlikama presjeka izrađujemo najjednostavnije kovanjem valjanih profila (štapova, vrpca) u otkovke. Kujemo obično u toplom stanju. Pri kovanju u hladnom stanju tvar jako očvrsne, a tada su moguće samo male deformacije.

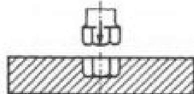
Slobodno kovanje (a) – ručno ili strojno – izvodi se velikim brojem udaraca, a rabi se pri pojedinačnoj izradbi i pri velikim otkovcima.

Kovanje u kalupu (b) izvodi se manjim brojem udaraca, daje točnije izmjere otkovka, a rabi se pri višebrojnoj izradbi.

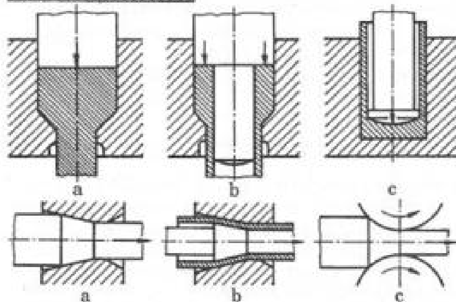
Pri valjanju lima ili profila između dva valjka smanjujemo debljinu izratka za razliku Δh ($= h_0 - h$) koja je ovisna od promjera valjaka $2\,R$ i faktora trenja μ

$$\Delta h \le 2\,R\,(1 - \cos\alpha) = 2\,R(1 - 1/\sqrt{\mu^2 + 1}).$$

Fino valjanje (»glačanje«) je fina obradba tokarenih ili brušenih kovinskih ploha plastičnom deformacijom pri kojoj površinski sloj jako očvrsne.

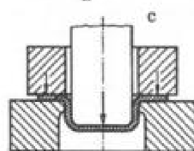


Utiskivanje patrice (utisnog alata pozitivnoga oblika) u tvar izrađujemo razne gravure ili udubine (negativnog oblika).

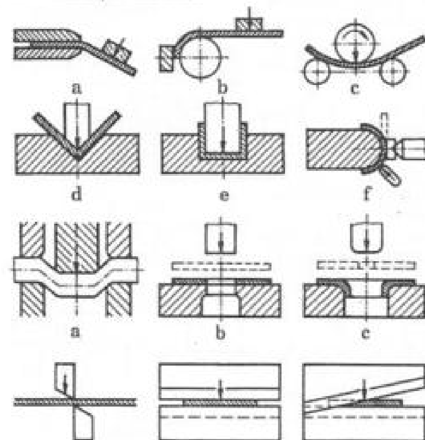


Istiskivanje (hladnim) tvari kroz matricu (istosmjerno – a, b) ili protiv patrice (protusmjerno – c) oblikujemo štapove, profile, cijevi (ponajprije od Sn, Pb, Zn, Al, Cu i sl.).

Vučenje (kalibiranje) kroz matrice (a,b) ili valjke (c) dobivamo vučene profile i žicu.



Duboko izvlačenje lima iz pripremljenih odrezaka (platina odn. kružno izrezanih rondela) – pri jednostavnim proizvodima u jednom stupnju, pri zahtjevnijim u više stupnjeva.



Savijanje ponajprije lima i to: slobodno (a, b), pomoću valjaka (c), u kalupima (d, e) ili postupnim razvlačenjem preko modela (f).

Smično preoblikovanje rabimo npr. za savijanje štapa u koljenčastu osovinu (a), stvaranjem rupa u limu – čistih (b) ili s prirubom (c).

Odrezivanje je postupak pri kojem smičnim opterećenjem odvajamo dijelove izradka.

Oblikovanje polimernih tvari

Većina oblikovanih polimernih proizvoda i poluproizvoda je od plastomera; od duromera ih je manje.

Plastomere možemo lijevati (gravitacijskim ili centrifugalnim postupkom), no mnogo više ih oblikujemo tlačnim lijevanjem u kokilama (proizvode kabastog oblika) ili istiskivanjem kroz matrice (profile, cijevi, ploče). Dodatnim razvlačenjem izrađuju se folije (debljine 0,02 ... 0,3 mm).

Duromere lijevamo ili prešamo u kalupima (tlakom 150 ... 1 000 bar pri temperaturama alata 140 ... 180 °C).

Primarni oblik polimera za preradbu su prašak i granule.

Kod tlačnog lijeva i istiskivanja tvar se potiskuje pužnim vijkom ili stapom, a za prešanje rabe se preše (tijeskovi) i to: ručne (50 ... 800 kN), mehaničke 400 ... 1 500 kN) ili hidrauličke (150 ... 10 000 kN).

SINTERIRANJE

Sinteriranjem spajamo tvari (mješavine od sastavnica koje se drugim tehnološkim metodama ne daju spajati (ili veoma teško).

Mješavinu sastavnica u obliku prašine (veličine zrna 1 ... 500 m) ponajprije stlačimo (hladno ili vruće) velikim tlakom (1 ... 10 kbar) u konačni oblik, da bi ih zatim pri visokim temperaturama sinterirali (difuzijski stopili).

Temperature sinteriranja su: za bakrene slitine 600 ... 800 °C, za željezne slitine 1 000 ... 1 300 °C, za karbidne tvrde kovine 1 400 ... 1 600 °C, za Mo, W, Ta i sl. 2 000 ... 2 900 °C.

Veličinom zrna sastavnica, tlakom pri tlačenju i temperaturom sinteriranja utičemo na poroznost sastavljene tvari:

Obujamni udio pora	uporaba
do 60 %	– filtri
do 30 %	– klizni ležaji
15 ... 20 %	– strojni dijelovi
do 5 %	– vrlo čvrsti strojni dijelovi.

Primjeri uporabe:

– karbidne tvrde kovine: sinteriranje tvrdih i krhkih volframovih, molibdenovih ili tantalovih karbida žilavim vezivom, npr. kobaltom

– »dijamantne kovine«: sinteriranje dijamantnih zrnaca (ili drugih tvrdih tvari, npr. korunda) kovinskim vezivom

– slitine sastavnica vrlo različitih tališta: sinteriranje kovina razmjerno visokog tališta (Fe, Ni, Co) s kovinama vrlo niskih tališta (Zn, Cd, Pb)

– slitine za filtre i klizne ležaje: sinteriranje kovina i kovinskih spojeva željene poroznosti (kod ležaja valja pore natopiti uljem)

– slitine za četkice kolektorskih električnih strojeva: sinteriranje grafita (klizavost) i bakra (vodljivost)

– slitine za električne kontakte: sinteriranje volframa ili molibdena (tvrdoća) s bakrom ili srebrom (vodljivost).

ZAVARIVANJE [1]

Zavarivanje pritiskom (HRN C.T3.001 – 1971)

1. Plinsko zavarivanje pritiskom. Dijelove zagrijemo plinskim plamenom te ih zavarimo pritiskom.

2. Aluminotermijsko zavarivanje pritiskom. Dijelove zagrijemo toplinom egzotermne reakcije aluminija s oksidom kovine koja se zavaruje, te ih zavarimo jakim pritiskom u prešama.

3. Sučeljeno zavarivanje električnim otporom

a) *Zavarivanje pritiskom* je postupak u kojem propuštamo jaku električnu struju kroz oba dijela koja zavarujemo, a koji su u stalnom dodiru. Na mjestu dodira stvara se Jouleova toplina pa se dodirno mjesto jako ugrije. Kad se postigne temperatura zavarivanja, oba dijela zavarimo jakim pritiskom.

b) *Zavarivanje iskrenjem* je postupak pri kojem propuštamo električnu struju kroz oba dijela koja zavarujemo, a koji se izmjenično dotiču i razmiču, pa se pri pojavi iskrenja dodirno mjesto jako zagrije. Kad se dostigne temperatura zavarivanja, oba dijela zavarimo jakim pritiskom.

4. Preklopno zavarivanje električnim otporom

a) *Točkasto zavarivanje* je zavarivanje dvaju dijelova stisnutih između dvije elektrode, kroz koje dovodimo električnu struju. Dodirno se mjesto obaju dijelova ugrije Jouleovom toplinom te se zavari pod pritiskom. To ponavljamo na limu u određenim razmacima.

b) *Šavno zavarivanje* srodno je točkastom zavarivanju, ali su elektrode izvedene u obliku koluta koji valjanjem po dijelovima što ih treba zavariti daju neprekinut zavar.

c) *Bradavičasto zavarivanje* je točkasto zavarivanje na pojedinim posebno ispupčenim mjestima lima (bradavicama) kroz koja prolazi električna struja.

5. Indukcijsko zavarivanje. Dijelove zagrijemo visokofrekventnom strujom te ih zavarimo pritiskom.

6. Zavarivanje trenjem. Dijelove zagrijemo trenjem između dodirnih ploha mirujućeg i rotirajućeg dijela te ih zavarimo pritiskom.

7. Hladno zavarivanje pritiskom. Dijelove dovedemo u tijesan dodir te ih jako stisnemo. Pri tom se pojavljuje međusobno prodiranje elementarnih čestica iz jednog dijela u drugi pa se oni kovinski spoje.

8. Zavarivanje ultrazvukom. Dijelovi se zagriju toplinom trenja zbog ultrazvučnog titranja, a zatim ih zavarimo pritiskom.

[1] Podjela zavarivačkih postupaka prema ISO 857. Terminologija i definicije: Recueil terminologique multilingue du sondage et des techniques connexes, 1988.

Zavarivanje taljenjem (HRN C.T3.001 – 1971)

1. Ljevačko zavarivanje rabimo uglavnom za popravak neispravnih odljevaka. Neispravni dio, ugrađen u poseban kalup, prelijevamo taljevinom dok se kvarno mjesto ne zatali.

2. Aluminotermijsko zavarivanje taljenjem. Termitni prašak, smjesa aluminija i željeznog oksida u prahu, izgara pri visokoj temperaturi uz oksidaciju aluminija i oslobađanje željeza iz željeznog oksida. Rastaljenim se željezom zavaruju čelični dijelovi.

3. Zavarivanje plinskim plamenom. Plamen stvaraju acetilen, rasvjetni plin, vodik ili teški ugljikovodici (benzen, teški benzin) s kisikom ili zrakom. Najvišu temperaturu plamena daje acetilen s kisikom. Kao dodatna tvar služe žice za zavarivanje koje talimo u plamenu.

4. Lučno zavarivanje kovinskom elektrodom

Električni luk nastaje između kovinske elektrode i predmeta koji zavarujemo. Ako se elektroda tali, rabi se i dodatna tvar. Kovinske elektrode koje se ne tale (volfram), rabe se samo za stvaranje električnog luka, a ako je potrebna dodatna tvar, dobiva se taljenjem dodatne žice u električnom luku.

a) *Lučno zavarivanje u slobodnoj atmosferi*
- golom elektrodom
- elektrodom s oblogom
- elektrodom s jezgrom
- položenom elektrodom.

b) *Elektrolučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi*
- u inertnom plinu (Ar, He itd.)
  volframovom (»tungsten«) elektrodom (postupak TIG)
  kovinskom elektrodom (postupak MIG)
- u ugljičnom dioksidu (CO_2)
  kovinskom elektrodom (postupak MAG – CO_2)
- u vodenoj pari ili smjesi zaštitnih plinova
- pod zaštitnim praškom (postupak EPP)
- pod zaštitom vodika atomiziranjem (disocijacijom vodikovih molekula i njihovim ponovnim spajanjem, što povisuje temperaturu na mjestu zavarivanja).

5. Elektrolučno zavarivanje ugljenom elektrodom

Električni luk nastaje između dviju ugljenih elektroda ili između elektrode i predmeta koji zavarujemo. Po potrebi dodajemo još i žicu kao dodatnu tvar. Postupak se može obavljati u slobodnom ili zaštićenom prostoru, a rabi se za tanke limove i za kutne zavare.

6. Zavarivanje pod troskom

Proces započinje elektrolučnim taljenjem praška i stvaranjem troske. Kad se skupi dovoljno troske koja pokriva rastaljenu kovinu, prekida se električki luk, a dodatno dovedenu žicu u trosku talimo Jouleovom toplinom razvijenoj pri prolasku električne struje kroz trosku.

7. Posebni postupci zavarivanja

a) *Zavarivanje elektronskim mlazom.* Kinetička se energija ubrzanih elektrona pri udaru u kovinu pretvara u toplinu kojom talimo tvar.

b) *Zavarivanje plazmom.* Kovinu talimo toplinskom energijom plazmenog luka. (Plazma nastaje disocijacijom i ionizacijom plina.) Rastaljenu kovinu štitimo zaštitnim plinom.

c) *Zavarivanje laserom.* Kovinu talimo usmjerivanjem laserskog snopa na mjesto zavarivanja.

Aluminotermijsko zavarivanje

Aluminotermijsko zavarivanje je postupak zavarivanja kemijskom energijom oslobađenoj pri egzotermičkoj reakciji između aluminija i željeznih oksida.

Reakcijska smjesa – termit – sastoji se od jednog dijela aluminijskog praška i triju dijelova željeznih oksida (okujina) – kao egzotermičkog dijela smjese – te sitnih čeličnih otpadaka i legirnih dodataka – za dodatnu kovinsku masu.

Pri egzotermijskoj reakciji (redoks) termita, aluminij reducira željezne okside te i sam oksidira, pri čemu se oslobađa znatna toplina (temperatura dostiže 2 800 ... 3 000 °C):



$$3\,FeO + 2\,Al \rightarrow 3\,Fe + Al_2O_3 + 835\ kJ$$



$$Fe_2O_3 + 2\,Al \rightarrow 2\,Fe + Al_2O_3 + 820\ kJ.$$

Postupak je prikladan za zavarivanje teških strojnih dijelova, tračnica i sl.

Elektrootporno zavarivanje

Potrebna toplina za zavarivanje stvara se na dodirnim površinama dijelova koje treba zavariti uslijed otpora, kao Jouleova toplina

$$Q = U\,I\,t = I^2 R\,t$$

gdje su: U napon, I struja, R električni otpor i t vrijeme.

U međusobnom dodiru obaju dijelova može se postići temperatura 1 260 ... 1 480 °C, što je dovoljno da se tvar pod pritiskom zavari.

Debljina pojedinog lima	Promjer elektrode	Promjer dodirne plohe	Srednja kvaliteta zavarene točke		
			sila elektroda	vrijeme zavarivanja	stanje zavarivanja
s/mm	d/mm	d/mm	F/N	t/s	I/A
0,5	9,75	4,5	600	0,2	4 000
1	12,5	5,5	1 000	0,4	5 000
2	16	7,5	2 000	1,0	7 000
3	18	9	3 000	1,8	9 000
4	25	11	3 800	2,8	10 000
5	25	13	4 500	3,9	12 000
6	30	15	5 500	5,5	14 000

Zavarivanje plinskim plamenom

Žice za zavarivanje plinskim plamenom (HRN C.H3.051-181) [1]

Za zavarivanje čelika plinskim plamenom rabimo čelične žice koje se označuju dvostrukom oznakom i to:

– općom oznakom P

– dodatnom oznakom s tri simbola koji označuju mehanička svojstva žice i to (redom): vlačnu čvrstoću R_m/(N/mm²), istezljivost A/% i udarnu radnju loma KV/J:

Čvrstoća R_m/N/mm²	Znak	Istezljivost A/%	Znak	Udarna radnja loma KV/J	Znak
–	O	–	O	–	–
340	Z	14	Z	30	Z
340	Y				
400	1	14	1	30	1
430	2	18	2	60	2
470	3	22	3	90	3
510	4	26	4	120	4
550	5	30	5	150	5
590	6				

Primjer:

svojstva žice: R_m = 480 N/mm², A = 29 %, KV = 100 J
oznaka P-343

Promjeri žica: d/mm (1,0) (1,6) 2,0 2,5 3,15 4,0 5,0 6,3

Duljina žica: u komadima od 1 000 mm, u svitcima do mase 40 kg.

Zavarivanje acetilenskim plamenom

Debljina predmeta [2]	Kisik		Potrošak acetilena	Brzina zavarivanja	
	predtlak	potrošak		čelik	lake kovine
s/mm	p/bar	q_v/l/h	q_v/l/h	v/m/h	v/m/h
0,2 ... 0,5	0,5	50	50	10 ... 12	12 ... 15
0,5 ... 1	0,75	85	75	7 ... 10	8 ... 12
1 ... 2	1	165	150	6 ... 8	7 ... 9
2 ... 4	1,25	325	300	5 ... 7	4 ... 8
4 ... 6	1,5	500	475	4 ... 6	4 ... 6
6 ... 9	1,75	75	700	3 ... 5	2 ... 3
9 ... 14	1,75	1 200	1 100	2 ... 3,5	1 ... 2
14 ... 20	2	1 700	1 600	1,5 ... 2,5	0,6 ... 1,2
20 ... 30	2,25	2 500	2 350	1 ... 2	–
30 ... 50	2,25	3 500	3 300	0,7 ... 0,9	–
50 ... 70	3	4 750	4 500	0,5 ... 0,7	–
70 ... 100	3,5	7 350	7 000	0,3 ... 0,5	–

[1] Na temelju EN 440 i DIN 8554.

[2] Iznad 14 mm praktički se ne primjenjuje.

Zavarivanje vodikovim plamenom

Debljina predmeta $\frac{s}{mm}$	Kisik predtlak $\frac{p}{bar}$	Kisik potrošak $\frac{q_v}{l/h}$	Potrošak vodika $\frac{q_v}{l/h}$	Brzina zavarivanja $\frac{v}{m/h}$
0,2 ... 0,5	0,75	35	140	7 ... 10
0,5 ... 1	1	75	300	6 ... 9
1 ... 2	1	150	675	4 ... 7
2 ... 4	1,25	300	1 350	3 ... 5
4 ... 6	1,5	500	2 250	2 ... 3,5

Zavarivanje plamenom rasvjetnog plina

Debljina predmeta $\frac{s}{mm}$	Kisik predtlak $\frac{p}{bar}$	Kisik potrošak $\frac{q_v}{l/h}$	Potrošak vodika $\frac{q_v}{l/h}$	Brzina zavarivanja $\frac{v}{m/h}$
0,2 ... 0,5	1	80	200	4 ... 7
0,5 ... 1	1,25	130	350	2 ... 5
1 ... 2	1,5	270	600	1,5 ... 3
2 ... 3,5	1,75	500	1 200	1 ... 2

Rezanje kovina

Rezanje kovina plinskim plamenom (»autogeno«) rabi se za čelik, pri čemu se iskorištava toplina izgaranja (oksidacijska) željeza.

Plamenom se iznimno lako reže nelegirani ili nisko legirani mekani čelik C < 0,3 %, kod tvrđeg čelika C > 0,5 % rezanje plamenom moguće je jedino dodatnim zagrijavanjem. Rezanje plamenom legiranih čelika ovisno je o pojedinim legiranim sastavnicama.

Različiti iznimni postupci rezanja plamenom omogućuju rezanje i u slučajevima kad običan postupak nije uporabljiv.

Rezanje nelegiranih čelika plamenom

Debljina predmeta $\frac{s}{mm}$	Kisik predtlak $\frac{p}{bar}$	Kisik potrošak $\frac{q_v}{l/h}$	Potrošak vodika $\frac{q_v}{l/h}$	Brzina zavarivanja $\frac{v}{m/h}$
5	2,0	65	13,0	22
10	3,0	120	20,0	19,5
20	4,0	215	22,5	16
50	5,0	580	57,0	11
100	7,5	1 240	111,0	7,5
150	9,0	2 180	155,0	6
200	10,0	3 125	190,0	5
300	13,0	5 650	258,0	3,75

Sivi lijev, bakar i lake kovine režemo iznimnim postupcima rezanja plamenom (slaba kvaliteta reza) i pretaljivanjem s obloženom elektrodom (slaba kvaliteta reza) ili plazmom (dobra kvaliteta reza) i laserom (tvari manje debljine).

Elektrolučno zavarivanje čelika

Za elektrolučno zavarivanje čelika rabe se čelične elektrode. S obzirom na izgled razlikujemo:

- gole elektrode
- elektrode s jezgrom
- elektrode s oblogom.

Obložene elektrode za ručno zavarivanje nelegiranih ili niskolegiranih čelika s malo ugljika (HRN C.H3.011 – 1982)

Oznaku elektrode čine:

- opća oznaka
- oznaka mehaničkih svojstava
- oznaka vrste obloge
- oznaka iskoristivosti
- oznaka položaja zavarivanja
- oznaka vrste struje.

1) Opća oznaka elektrode je: E

2) Oznaka mehaničkih svojstava

Vlačna čvrstoća R_m/(N/mm²)	Istezljivost A_{min}/ %	Temperatura koja odgovara udarnoj radnji loma KV = 28 J t / °C	Oznaka
430 ... 510	–	–	430
	20	+20	431
	22	0	432
	24	-20	433
	24	-30	434
	24	-40	435
510 ... 610	–	–	510
	18	+20	511
	18	0	512
	20	-20	513
	20	-30	514
	20	-40	515

3) Oznaka vrste obloge

Vrsta plašta	Oznaka	Vrsta plašta	Oznaka
kiseo	A	oksidan	O
kiseo – rutilan	AR	rutilan – osrednje debeo (TiO_2)	R
bazičan	B	rutilan – debeo	RR
celulozan	C	ostale vrste	S

4) Iskoristivost (HRN C.H3.020 – 1982) je omjer kovinske mase rastaljene dodatne tvari i jezgrene mase ispitivane elektrode. Oznaka iskoristivosti navodi se samo u slučaju vrijednosti veće od 105 % i to uvijek zaokruženo na pune desetice, tj.:

110 – 120 – 130 – 140 itd.

5) Oznaka položaja zavarivanja

Položaj pri zavarivanju	Oznaka
svi položaji	1
svi položaji osim okomito odozgo prema dolje	2
sučeljeni i kutni spoj u vodoravnom položaju, kutni spoj u vodoravno-okomitom položaju	3
sučeljeni i kutni spojevi u vodoravnom položaju	4
kutni spoj u vodoravnom položaju	5

6) Oznaka vrste struje

Istosmjerna struja preporučena polarnost	Izmjenična struja nazivni napon praznog hoda	Oznaka
+		0
+ ili −	50 V	1
−	50 V	2
+	50 V	3
+ ili −	70 V	4
−	70 V	5
+	70 V	6
+ ili −	90 V	7
−	90 V	8
+	90 V	9

Tablica vrijedi za elektrode promjera $d \geq 2{,}5$ mm. Pri manjim je promjerima potreban viši napon praznog hoda.

7) Za bazične elektrode (B) označuje se i količina vodika u čistoj kovini zavara

Količina vodika u ml u 100 g čiste kovine zavara ml/100 g	Oznaka
3 ... 5	H
1 ... 3	2 H
1	3 H

Primjeri za oznake elektroda:

- Obložena elektroda s rutilnom oblogom osrednje debljine, vlačne čvrstoće R_m iznad 500 N/mm², istezljivosti A iznad 23 % i udarne radnje loma KV iznad 71 J pri +20 °C i iznad 20 J pri −20 °C, za zavarivanje u svim položajima izmjeničnom strujom i s naponom praznog hoda 50 V ili istosmjernom strujom na pozitivnom polu:

oznaka elektrode: E 43 2 R 13

- Obložena elektroda s bazičnom oblogom, vlačne čvrstoće R_m iznad 560 N/mm², istezljivosti A iznad 22 % i udarne radnje loma KV iznad 47 J pri −20 C, iskoristivosti 158 %, za zavarivanje u svim položajima osim okomito prema dolje pomoću istosmjerne struje, uz količinu vodika u čistoj kovini zavara 1 ... 2 ml/100 g:

oznaka elektrode: E 51 3 B 160 20 2H.

Obložene elektrode za ručno zavarivanje sivog lijeva (HRN C.H3.016 - 1984)

Oznaku elektroda tvore:

- opća oznaka
- oznaka kemijskog sastava
- oznaka vrste plašta
- oznaka položaja zavarivanja i vrsta struje.

1) Opća oznaka elektrode: E.

2) Oznaka kemijskog sastava

Vrsta elektrode: skupina	Vrsta elektrode: karakteristični sastav [1] u %	Vrsta slitine čiste kovine zavara	Oznaka elektrode
na temelju željeza	Fe + 3,4 C; 2,9 Si	sivi lijev	FeC 1
	Fe + 0,15 C; 0,03 Si	sivi lijev, legiran iz plašta	FeC 2
		čelik	Fe
na temelju nikla	Fe + 53 Ni; 4,0 Si	slitina nikla i željeza	NiFe
	55 Ni; 40 Cu; 4,5 Fe	slitina nikla i bakra	NiCu 1
	65 Ni; 30 Cu; 4,5 Fe		NiCu 2
	85 Ni; 8 Fe; 4,0 Si	nikal	Ni
na temelju bakra	Cu + 10 Al	aluminijska bronca	CuAl
	Cu + 5 Sn	kositrena bronca	CuSn 1
	Cu + 8 Sn		CuSn 2

3) Oznaka vrste obloge

Vrsta obloge	Oznaka
bazična	B
grafitna	G
bazična s grafitom	BG
na temelju soli i celuloze	S
ostale vrste	V

4) Oznaka položaja zavarivanja i vrsta struje

Ovdje vrijede jednake oznake kao kod elektroda za zavarivanje čelika – v. str. 708 (pod 5 i 6).

Primjer oznake elektrode:

Elektroda s plaštem sa čistom kovinom zavara FeNi (55/45 %), s grafitnom oblogom, samo za horizontalni položaj zavarivanja istosmjernom strujom na pozitivnom polu ili izmjeničnom strujom pri naponu praznog hoda 75 V:

oznaka elektrode: E (NiFe) G 49.

[1] Navedene su zaokružene prosječne vrijednosti karakterističnih sastavnica. Podroban kemijski sastav svih navedenih elektroda predočen je u normi HRN C.H3.016 - 1984.

Potrebna jakost struje

Gole elektrode, elektrode s tankom oblogom i elektrode s jezgrom		Elektrode s debelom oblogom	
promjer d/mm	jakost struje I/A	promjer d/mm	jakost struje I/A
2	50 ... 70	2	50 ... 80
3	90 ... 130	2,5	60 ... 110
4	140 ... 190	3,25	90 ... 160
5	190 ... 250	4	130 ... 200
6	240 ... 330	5	180 ... 260
		6	230 ... 350

Priprema čelika za zavarivanje (neki slučajevi)

Skica	Debljina lima s/mm	Razmak limova b/mm	Promjeri elektrode d/mm: gole, s tankom oblogom, s jezgrom	Promjeri elektrode d/mm: s debelom oblogom
	1	0	2	2
	1,5	0,5	2	2
	2	1	2	2,25
	3	2	3	3,25
	4	2	4	4
	5	2	4	4
60°...70°, 1,5...2 mm	5	1	4	3,25, 4
	6	1,5	4, 5	3,25, 4
	8	2	4, 5	3,25, 4, 5
	10	2	4, 5	3,25, 4, 5
	12	2	4, 5	3,25, 4, 5
	14	2	4, 5	4, 5, 6
	16	2	4, 5	4, 5, 6
70°, 1,5...2 mm	12	1,5	4, 5	3,25, 4, 5
	14	1,5	4, 5	3,25, 4, 5
	16	1,5	4, 5	3,25, 4, 5
	18	1,5	4, 5	4, 5, 6
	20	2	4, 5	4, 5, 6
	25	2	4, 5	–

Priprema rubova za zavarivanje čelika pri većim debljinama

Skica	Debljina lima s/mm	Dubina otvora a/mm	Dubina otvora b/mm	Kut otvora α/°	Kut otvora β/°
	50	30	20	60	60
	60	36	24	60	60
	70	42	28	50	60
	80	48	32	50	60
	90	54	36	50	50
	100	60	40	50	50
	110	66	44	45	50
	120	62	48	45	50

Priprema rubova za zavarivanje dvostrukog U-zavara kod debelih ploča

Debljina ploča s/mm	Otvor žlijeba a/mm	Otvor žlijeba b/mm	Oblik žlijeba x/mm	Oblik žlijeba y/mm
140	60	16	20	8
			30	10
			40	12
160	70	18	50	14
			60	16
			70 [1]	18 [1]

Priprema limova za čelične konstrukcije

s/mm	a/mm
5	2
6	2 ... 3

s/mm	a/mm	α/°
8	2 ... 3	30
10	3	35
12	3	35

s/mm	a/mm	α/°	β/°
15	3	30	30
18	3	30	35

Deformacije konstrukcija zbog skupljanja zavara

Zavar		Kut deform.	
◺	a/mm	α/°	
5	7	1	3
9	12,5	7	13

Najznačajniji postupci zavarivanja i rezanja plinskim plamenom

Način zavarivanja	Debljina mm: čelik	Debljina mm: lake kovine	Debljina mm: ostale kovine
sučeljeno iskrenjem	(0,2 ... 40 000 mm²)	do 10 000 mm²	Cu, mjed (do 500 mm²)
točkasto	2 × 12	2 × 5	Cu slitine 2 × 2
šavno	0,1 ... 2,5	0,1 ... 1,5	Cu slitine 0,1 ... 1,2
plinskim plamenom	1 ... 40	2 ... 40	Cu 2 ... 30,
elektrolučno			
– s kovinskom elektrodom	1 ... 40 (... 100)	2 ... 25	Cu 2 ... 30
– s ugljenom elektrodom	1 ... 40	2 ... 12	Cu 2 ... 15, Pb 2 ... 8
– u argonu	–	1 ... 20	–
– u vodiku	1 ... 40	–	Cu slitine 1 ... 10
– pod praškom	5 ... 100	–	–
rezanje plinskim plamenom	0,5 ... 500 (... 1000)	–	–

[1] Samo kod debljine ploča s = 160 mm.

Zavarivanje polimera

Od polimera prikladnih za zavarivanje su plastomeri i elastomeri, dok se duromeri ne mogu zavarivati.

Polimeri se zavaruju vrućim plinom (zrakom, dušikom), vrućim alatom, visokofrekventnom strujom, trenjem itd.

LEMLJENJE

Lemljenje je spajanje kovinskih dijelova pomoću lema kao dodatne tvari. Pri lemljenju se lem rastali, dok se spajani dijelovi samo zagriju:

- do temperature ispod tališta lema uz neposredno zagrijavanje lema (lemilom ili plamenikom)
- do temperature iznad tališta lema pri posrednom zagrijavanju lema (umetnutog) putem ugrijanih spajanih dijelova.

Dodirne plohe spajanih dijelova čiste se mehanički, kemijski i pomoćnim sredstvima.

Meko lemljenje

Za meko lemljenje čelika i neželjeznih kovina rabe se:

- meki lem (v. str. 469)
- pomoćna sredstva: cinkov klorid $ZnCl_2$ (sa solnom kiselinom HCl), salmijak NH_4Cl, kolofonij.

Tvrdo lemljenje

Za tvrdo lemljenje čelika i neželjeznih kovina potrebni su:

- tvrdi lem (bakreni ili mjedeni) (str. 469) ili srebrni lem (str. 470)
- pomoćna sredstva, talila (npr. boraks $Na_2B_4O_7 \cdot 10\ H_2O$) s dodatcima fluorida, fosfata, silikata i sl.

Za lemljenje aluminija rabe se posebni lemovi (str. 470), dok su talila fluoridi i kloridi lakih kovina (Li, Be).

LIJEPLJENJE KOVINA

Ljepila za lijepljenje kovina:

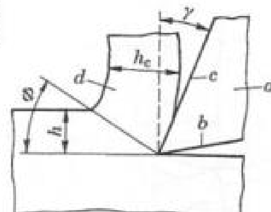
- anorganska ljepila (mineralnih, keramičkih ili staklastih sastavnica) su postojanija pri višim temperaturama, ali su krhkija
- organska ljepila (od prirodnih ili umjetnih spojeva ugljikovodika, npr. epoksidne smole) vezuju fizikalno ili kemijski, žilava su, no postojana su samo pri nižim temperaturama (do približno 150 °C).

Jednokomponentna ljepila su pripremljena kao pasta s prikladnim otapalom, koje pri lijepljenju ishlapi, ili su suho umetnuta među spajane plohe te lijepe dovođenjem topline.

Kod *dvokomponentnih ljepila* primješani otvrđivač djeluje na ljepilo (kao pastu ili tekućinu) neposredno prije lijepljenja čime izaziva polimerizaciju ljepila, a time i njegovo očvršćivanje.

Temelji

Pri obradbi tvari odvajanjem čestica nastaje strugotina debljine h_c, koja je veća od debljine rezanja h.



a alat
b stražnja ploha
c prednja ploha
d strugotina

Faktor sabijanja je

$$\Theta_h = h_c/h = \cos(\Phi - \gamma)/\sin\varphi > 1$$

gdje su: φ kut rezanja i γ prednji kut alata.

$$\varphi = \text{arc tan}\,[\cos\gamma/(\Theta_h - \sin\gamma)].$$

Za $\gamma = 0°$ je $\varphi = \text{arc tan}\,[1/\Theta_h]$.

Faktor sabijanja ovisi o brzini rezanja v_c.

Strugotina klizi po prednjoj plohi brzinom v_r, koja ovisi o brzini rezanja v_c, kutu rezanja φ i prednjem kutu γ

$$v_r = v_c \sin\varphi/\cos(\varphi - \gamma) = v_c/\Theta_h.$$

Brzina deformacije tvari u ravnini rezanja iznosi

$$v_s = v_c \cos\gamma/\cos(\varphi - \gamma).$$

Pri obradbi žilavih i mekih tvari redovito nastaje neprekinuta (tekuća) strugotina, dok je strugotina pri obradbi krhkih tvari izlomljena i rastrgana. Neprekinuta strugotina nastaje ako tvar može postići neki najmanji stupanj deformacije.

*

Najveći se dio energije utrošen na oštrici alata za odvajanje strugotine pretvara u toplinu. Toplina nastaje:

- zbog kidanja atomnih veza u obrađivanoj tvari (u području rezanja)
- zbog trenja između alata (na stražnjoj plohi) i izradka, te između alata (na prednjoj plohi) i strugotine.

Nastali toplinski tok iznosi

$$\Phi = A\, v_c\, k_c$$

gdje su: A presjek odvojene tvari; v_c brzina rezanja; k_c sila reducirana na površini rezanja.

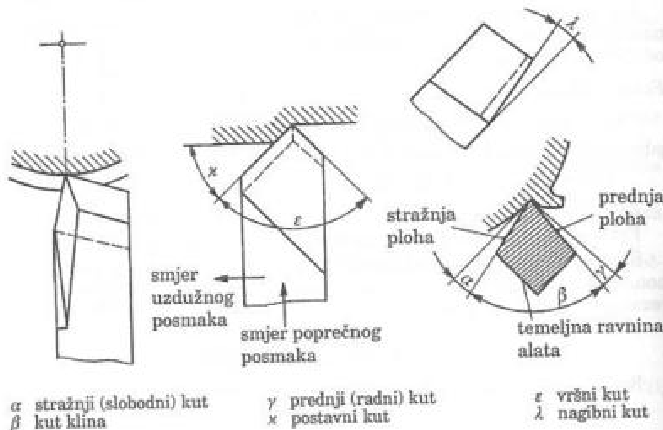
Toplinski tok koji zagrijava strugotinu iznosi

$$\Phi' = \Delta T \cdot A\, v_c\, \varrho\, c < \Phi$$

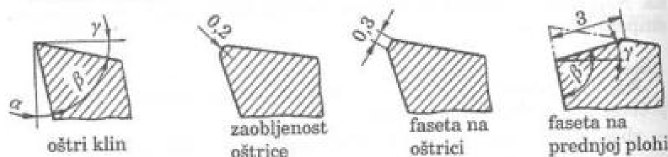
gdje su: $\Delta T = (T_2 - T_1)$ temperaturna razlika između temperature strugotine T_2 i temperature tvari T_1, ϱ gustoća; c specifični toplinski kapacitet tvari.

Geometrija oštrice

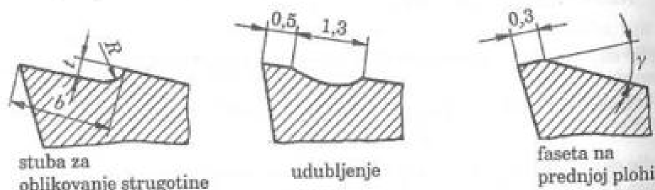
Kutovi alata



Oblici oštrica



Pojačanje klina zaobljenjem, fasetom na oštrici ili fasetom na prednjoj plohi.



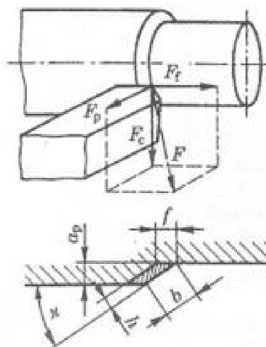
Odvođenje strugotine stubom, udubljenjem ili fasetom na prednjoj plohi.

Tokarenje

Silu rezanja alata F, koja mora svladati otpor rezanja tvari, rastavljamo u tri sastavnice:

- posmičnu silu F_f
- odrivnu silu F_p
- glavnu silu F_c

$$F = \sqrt{F_f^2 + F_p^2 + F_c^2}$$



Glavna sila F_c iznosi:

$$F_c = k_{c1\times1}\, b\, h\, (h_s/h)^{c_c}$$

$$b = a/\sin \varkappa$$

$$h = f/\sin \varkappa$$

gdje su: $k_{c1\times1}$ reducirana sila rezanja, b širina rezanja, h geometrijska debljina strugotine, h_s normalna debljina strugotine 1 mm, a_p dubina rezanja, f posmak, $\varkappa$ postavni kut; c_c eksponent debljine ovisan o tvari.

Za određivanje posmične sile F_f i odrivne sile F_p često rabimo omjer koji vrijedi za postavni kut $\varkappa = 45°$:

$$F_f : F_p : F_c = 1 : 2 : 5$$

Uz drugačiji postavni kut $\varkappa'$, glavna sila F_c' iznosi

$$F_c' = F_c \left(\frac{\sin 45°}{\sin \varkappa'}\right)^{c_c}$$

Reducirana sila rezanja $k_{c1\times1}$ i eksponent c_c

Obrađivana tvar	$k_c 1\times1$ N/mm²	c_c
čelik		
Č 0545	1 990	0,26
Č 0645	2 110	0,17
Č 0745	2 260	0,30
Č 1531	2 220	0,14
Č 1731	2 130	0,18
Č 4320	2 100	0,26
Č 5421	2 260	0,30
Č 4731	2 240	0,21
Č 4732	2 500	0,26
sivi lijev SL 25	1 160	0,26
tvrdi lijev	2 060	0,19
bronca	1 780	0,17
mjed	780	0,18
Al slitine	640	0,25
Mg slitine	280	0,19

Kutovi oštrice i brzine rezanja pri tokarenju čelika alatom od tvrde kovine

Obrađivana tvar		Vrsta reza [1]	Nož				Brzina rezanja [4] v_{c240}/(m/min)				
vrsta	čvrstoća R_m/(N/mm²)		tvrde kovine [2]	prednji kut i kut nagiba (°) [3]			pri posmaku f (mm/okr.)				
				γ	γ_f	λ	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6
čelični lijev	< 520	m v	P 10 P 30	8 6	– –5	0 ... 4 5 ... 10	135 –	110 –	95 40	80 32	– 27
	520 ... 700	m v	P 10 P 30	6 6	– –5	0 ... 4 5 ... 10	110 –	90 –	75 30	65 25	– 22
	> 700	m v	P 10 P 30	6 6	– –7	0 ... 4 5 ... 10	70 –	60 –	50 20	45 17	– 14
meki čelik	< 500	m v	P 10 P 30	15 12	– –3	0 ... 4 5 ... 10	250 –	210 –	180 85	150 70	– 60
polutvrdi čelik	500 ... 700	m v	P 10 P 30	12 10	– –3	0 ... 4 5 ... 10	220 –	185 –	155 65	130 55	– 45
tvrdi čelik	700 ... 1 000	m v	P 10 P 30	10 8	– –3	4 ... 6 5 ... 10	165 –	135 –	110 45	85 35	– 25
legirani čelik	1 000 ... 1 400	m v	P 10 P 30	6 6	0 –7	0 ... 4 5 ... 10	85 –	65 –	55 22	45 18	– 14
	1 400 ... 1 800	m s	K 10 K 10	4 4	–3 –7	0 ... 4 5 ... 10	–	30	25	15	–
Mn tvrdi čelični lijev	–	m s	K 10 K 10	0 0	– –5	0 ... 4 5 ... 10	–	18	15	–	–
Mn tvrdi čelik kovani	–	m s	P 20 P 20	4 4	– –5	0 ... 4 5 ... 10	–	18	15	–	–
nehrđajući čelik lijevani	600 ... 700	m s	K 10 K 10	6 6	– –5	0 ... 4 5 ... 10	30	25	20	15	–
nehrđajući čelik kovani	600 ... 700	m s	P 10 P 20	12 12	– 0	0 ... 4 5 ... 10	80 –	65 40	50 30	45 25	– –
alatni čelik	1 500 ... 1 800	m s	K 10 K 10	0 0	– –5	3 ... 5 3 ... 5	23	18	15	12	–

[1] m – mali presjek, neprekinuti rez s dubinom rezanja do 3 mm i posmakom do 0,3 mm; s – srednji presjek, prekinuti rez s dubinom rezanja do 6 mm i posmakom do 0,6 mm; v – veliki presjek, prekinuti rez s dubinom rezanja do 10 mm i posmakom do 1,5 mm.

[2] Vrste tvrdih kovina – v. str. 441.

[3] Kutovi na alatu – v. str. 714. – γ_f je kut fasete na prednjoj plohi, široke od 0,5 do dva posmaka. α = 8°. Kut fasete na stražnjoj plohi α_f = 6°.

[4] v_{c240} brzina rezanja za postojanost T = 240 min. Za drugačiju postojanost alata vrijede ovi omjeri brzina rezanja:

$$v_{c60} : v_{c240} : v_{c480} = 1{,}26 : 1 : 0{,}89.$$

Kutovi oštrice i brzine rezanja pri tokarenju lijevanog željeza i neželjeznih kovina alatom od tvrdih kovina

Obrađivana tvar		Vrsta reza [1]	Nož					Brzina rezanja [4] v_c/(m/min)				
vrsta	tvrdoća HB		tvrde kovine [2]	stražnji, prednji i nagibni kut (°) [3]				pri posmaku f (mm/okr.)				
				α	α_f	γ	λ	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6
sivi lijev	... 200	m v	K 20 K 20	7 7	5 5	6 6	0 ... 4 5 ... 7	75	70	65	50	45
	200 ... 250	m v	K 10 K 10	7 7	5 5	6 3	0 ... 4 5 ... 7	45	40	35	30	27
sivi lijev legirani	250 ... 400	m v	K 10 K 10	6 6	4 4	0 0	0 ... 4 5 ... 7	23	21	20	18	16
bijeli temperirani lijev	–	m v	K 10 P 20	7 7	5 5	6 0	0 ... 4 5 ... 7	65 70	55 60	45 50	40 45	– –
crni temperirani lijev	–	m v	K 10 K 10	7 7	5 5	6 0	0 ... 4 5 ... 7	45	40	35	28	–
bakar, mjed	35 ... 40	m s	K 20	12	10	≈ 15	–5	150 ... 300		120 ... 200		
mjed. bronca	45 ... 85	m s	K 20	10	8	≈ 12	0	150 ... 400		120 ... 250		
	85 ... 200	m s	K 20	8	6	≈ 8	0 ... 3	200 ... 400		150 ... 250		
aluminij, Al slitine	... 60	m s	K 20	10	8	≈ 28	0	... 2 300		... 1 500		
Al slitine	60 ... 110	m s	K 20 K 10	8	6	≈ 16	0	250 ... 700		150 ... 500		
Al slitine < 13,5 % Si	–	m s	K 10	8	6	≈ 11	0	100 ... 500		80 ... 150		
Al slitine > 13,5 % Si	–	m s	K 05	8	6	≈ 8	0	70 ... 120		50 ... 90		

[1] m – mali presjek, neprekinuti rez s dubinom rezanja do 3 mm i posmakom do 0,3 mm; s – srednji presjek, mali prekidi reza s dubinom rezanja do 6 mm i posmakom do 0,6 mm; v – veliki presjek, tvrda mjesta ili prekidi reza s dubinom rezanja do 10 mm i posmakom do 1,5 mm.

[2] Vrste tvrdih kovina – v. str. 441.

[3] Kutovi oštrice noža – v. str. 714. – α_f je kut fasete na stražnjoj plohi oštrice. (Faseta pod kutom γ_f na prednjoj plohi nije potrebna.)

[4] Navedene brzine rezanja v_c vrijede za sivi temperirani lijev kao brzine rezanja v_{c240} pri postojanosti T = 240 min. Za drukčiju postojanost alata vrijede ovi omjeri brzina rezanja:

$$v_{c60} : v_{c240} : v_{c480} = 1{,}5 : 1 : 0{,}85.$$

Blanjanje i dubljenje

Pri *blanjanju* se stol s izratkom giba pravocrtno prema suportu s nožem; pri *dubljenju* (horizontalnom ili okomitom) giba se suport s nožem pravocrtno prema stolu s izratkom. Pri gibanju stola odnosno noža za dubljenje razlikujemo:

radni hod pri gibanju naprijed – nož reže

povratni hod pri gibanju natrag – nož ne reže.

Prosječna brzina gibanja stola odnosno noža za dubljenje iznosi:

$$v_m = 2\, v_d\, v_p/(v_d + v_p)$$

gdje su: v_d brzina rezanja pri radnom hodu, v_p brzina pri povratnom hodu.

Glavna sila rezanja (pri blanjanju ili dubljenju) iznosi:

$$F_c = k_{c1\times 1}\, b (h_s/h)^{c_c} \qquad b = a/\sin \varkappa \qquad h = f \sin \varkappa$$

gdje su: k_{c1x1} reducirana sila rezanja, b širina rezanja, h debljina rezanja, h_s normalna debljina rezanja 1 mm, a dubina rezanja, f posmak (pri dvojnom hodu) $\varkappa$ postavni kut, c_c eksponent debljine ovisan o tvari.

Za reduciranu silu rezanja k_{c1x1} i eksponent c_c valja odabrati iste vrijednosti kao pri tokarenju (v. str. 715).

Kutovi na noževima od tvrdih kovina ili brzoreznog čelika i brzine rezanja pri blanjanju ili dubljenju čelika i sivog lijeva

Obrađivana tvar		Nož			Brzina rezanja v_{c240}/(m/min) [3]		
			kutovi (°) [2]		pri posm. f mm		
vrsta	čvrstoća R_m/(N/mm²) tvrdoća HB	rezna tvar [1]	γ	γ_f	0,5	1,0	1,6
meki čelik	400 ... 500	P 40 h. j.	15 ... 20 12	0 ... –5 –	60 28	48 23	40 20
polutvrdi čelik	500 ... 800	P 40 h. j.	12 ... 15 8 ... 10	–5 ... –10 –	55 21	45 17	38 15
tvrdi čelik	750 ... 900	P 40 h. j.	10 ... 20 8	0 ... –5 –	40 14	35 11	30 10
sivi lijev	140 ... 180 HB	K 20 h. j.	15 ... 20 4	0 ... –5 –	50 25	40 18	30 14
sivi lijev	200 ... 220 HB	K 20 h. j.	10 ... 15 4	–5 ... –10 –	55 32	45 26	35 24

[1] Vrste tvrdih kovina (P 40, K 20) – v. str. 441! »h.j.« brzorezni čelik vrhunske kakvoće – v. str. 431!

[2] Nagibni kut $\lambda = -6 \ldots -15°$

[3] v_{c240} je brzina rezanja pri postojanosti alata $T = 240$ min. Uz drugu postojanost alata vrijede odnosi brzina rezanja:

pri obradbi čelika: $v_{c60} : v_{c240} : v_{c480} = 1{,}26 : 1 : 0{,}84$

pri obradbi sivog lijeva: $v_{c60} : v_{c240} : v_{c480} = 1{,}5 : 1 : 0{,}85.$

Bušenje i razvrtavanje

Vijačno svrdlo[1] reže s dvije oštrice. Prostorna krivulja po kojoj su smještene oštrice je zavojnica.

Kut uspona zavojnice *i vršni kut* svrdla ovise o tvari koju treba obraditi.

Obrađivana tvar	Kut uspona λ(°)	Vršni kut λ(°)
čelik – čvrstoće R_m < 700 N/mm²	30	118
– čvrstoće R_m > 700 N/mm²	25	118
– za poboljšanje, legirani	35 ... 40	118
sivi lijev	30	118
bakar, bronca	40	140
mjed	18 ... 20	130
Al slitine	40 ... 45	140
Mg slitine	40 ... 45	100

Presjek odreska za:

jednu oštricu $A_1 = d f_z/2 = d f/4$

obje oštrice $A = d f_z = d f/2$

gdje su: d promjer svrdla, f_z posmak za oštricu, f posmak (za 1 okretaj svrdla).

Sila rezanja za oštrice

$$F_{cz} = d\, f_z\, k_c/2 = d\, f\, k_c/4$$

gdje je k_c reducirana sila rezanja (za jedinicu presjeka).

Obrađivana tvar	k_c (N/mm²) pri f (mm/min⁻¹)					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
čelik R_m > 900 N/mm²	5 000	4 600	4 300	4 000	3 750	3 500
Č 0745	4 000	3 700	3 450	3 200	3 000	2 850
Č 0645	3 700	3 450	3 200	3 000	2 850	2 700
Č 0545	3 300	3 050	2 850	2 650	2 500	2 350
Č 0245	2 700	2 450	2 250	2 050	1 900	1 750
sivi lijev, tvrdi	2 100	1 900	1 700	1 500	1 350	1 200
meki	1 700	1 500	1 300	1 150	1 000	900
bakar, bronca	1 800	1 600	1 400	1 250	1 100	1 000
Al slitine	1 350	1 150	1 000	850	750	650
Mg slitine	900	750	650	550	475	400

[1] Naziv »spiralno« svrdlo, kako se često naziva, nije ispravan.

Bušenje svrdlima od brzoreznog čelika

Obrađivana tvar	Brzina rezanja v_c / m/min	Brzina vrtnje n i posmak f	Promjer svrdla d/mm 6,3	10	16	25	40	63
čelik 500 N/mm²	35,5	n okr./min f mm/okr.	1 800 0,16	1 120 0,20	710 0,25	450 0,32	280 0,40	180 0,50
čelik 700 N/mm²	22,4	n okr./min f mm/okr.	1 120 0,10	710 0,12	450 0,16	280 0,20	180 0,25	112 0,32
legirani čelik	11,2	n okr./min f mm/okr.	560 0,08	355 0,10	224 0,12	140 0,16	90 0,20	56 0,25
sivi lijev do SL 20	28,0	n okr./min f mm/okr.	1 400 0,18	900 0,22	560 0,28	355 0,36	224 0,45	140 0,56
sivi lijev do SL 25	18,0	n okr./min f mm/okr.	900 0,14	560 0,18	355 0,22	224 0,28	140 0,36	90 0,45

Razvrtavanje razvrtalima od brzoreznog čelika

Obrađivana tvar	Brzina rezanja v_c / m/min	Brzina vrtnje n i posmak f	Promjer razvrtala [1] d/mm 6,3	10	16	25	40	63
čelik do 700 N/mm²	7,0	n okr./min f mm/okr.	355 0,45	224 0,56	140 0,71	90 0,90	56 1,10	35,5 1,40
čelik iznad 700 N/mm²	2,24	n okr./min f mm/okr.	112 0,20	71 0,25	45 0,31	28 0,40	18 0,50	11,2 0,63
sivi lijev do 200 HB	11,2	n okr./min f mm/okr.	560 0,80	355 0,90	224 1,00	140 1,12	90 1,25	56 1,40
sivi lijev iznad 200 HB	5,6	n okr./min f mm/okr.	280 0,45	180 0,56	112 0,71	71 0,90	45 0,10	28 1,40
bakar i bakrene slitine	14,0	n okr./min f mm/okr.	710 0,80	450 0,90	280 1,00	180 1,12	112 1,25	71 1,40
lake kovine	22,5	n okr./min f mm/okr.	1 120 0,80	710 0,90	450 1,00	280 1,12	180 1,25	112 1,40

[1] Odstupanje od promjera: – 0,2 mm za promjere 6,3 i 10 mm
– 0,3 mm za promjere 16 i 25 mm
– 0,4 mm za promjere 40 i 63 mm.

Rezanje navoja na tokarilicama alatom od brzoreznog čelika

Obrađivana tvar	Brzina rezanja v_c/(m/min): ureznici i nareznici	Automatska navojna glava, navojni korak P/mm: 6 ... 4,5	4 ... 3	2,5 ... 1,75	1,5 ... 1	tokarski ili navojni nož
sivi lijev	2 ... 5	2 ... 3	2,5 ... 4	3 ... 4,5	4 ... 5	9 ... 12
temperirani lijev	2 ... 5	3 ... 6	4 ... 8	6 ... 10	8 ... 12	9 ... 12
čelični lijev	2 ... 5	1,5 ... 3	2 ... 4	3 ... 5	4 ... 6	9 ... 12
čelik						
340 N/mm²	3 ... 9	4 ... 5	4 ... 8	5 ... 10	6 ... 12	14 ... 18
420 N/mm²	3 ... 7	4 ... 5	4 ... 8	5 ... 10	6 ... 12	12 ... 16
500 N/mm²	2 ... 5	2 ... 3	3 ... 4	4 ... 5	4 ... 6	10 ... 14
600 N/mm²	2 ... 4	2 ... 3	3 ... 4	4 ... 5	4 ... 6	9 ... 12
CrNi, CrMo	1 ... 3	1 ... 2	1 ... 3	1,5 ... 3,5	2 ... 4	8 ... 10
bronza	2 ... 5	2 ... 3,5	2,5 ... 4	3 ... 4,5	3,5 ... 5	6 ... 8
crveni lijev	3 ... 8	4 ... 6	5 ... 8	6 ... 9	8 ... 12	12 ... 14
mjed	4 ... 12	4 ... 8	6 ... 10	8 ... 12	10 ... 20	25 ... 34
Al slitine	20	25	25	25	25	30 ... 40
Mg slitine	30	30	40	40	40	40

Piljenje kovina

Piljenje okvirnim pilama

Čvrstoća obrađivane tvari R_m / N/mm²	Brzina rezanja srednja v_c / m/min	Brzina rezanja najveća v_c / m/min	Broj hodova (dvojnih) u min pri hodu pile (mm) 140	150	160
... 700	30	47	108	98	93
700 ... 1 000	20	32	73	67	63
1 000 ... 1 300	14	22	50	47	43

Piljenje tračnim pilama

Obrađivana tvar	Brzina rezanja v_c / m/min	Obrađivana tvar	Brzina rezanja v_c / m/min
sivi lijev [1]	20 ... 30	bakar	80
konstrukcijski čelik	60	mjed, crveni lijev	100
alatni čelik	20 ... 30	lake kovine	400 ... 1 200

Piljenje kružnim pilama

Obrađivana tvar	Hladno rezanje: brzina rezanja v_c / m/min	Hladno rezanje: brzina posmaka v_f / m/min	Vruće rezanje: brzina rezanja v_c / m/min	Vruće rezanje: brzina posmaka v_f / m/min
sivi lijev	15 ... 45	20 ... 55		
čelik	30 ... 55	35 ... 60	... 6 000	50 ... 250
mjed, bronca	100 ... 200	100 ... 300		
lake kovine	400 ... 600	100 ... 300		

[1] Priljevci s grubom, tvrdom korom.

Glodanje

Glodanje povezuje kružno gibanje glodala (brzina rezanja) i pravocrtno gibanje izratka (posmak). Glodanje može biti obodno ili sučeljeno.

Pri obodnom glodanju razlikujemo protusmjerno glodanje (glodanje protivno smjeru posmaka) i istosmjerno glodanje (glodanje u smjeru posmaka).

Brzina rezanja: $v_c = d \pi n$

gdje su: d promjer glodala, n brzina vrtnje trna glodala.

Posmak za svaki zubac glodala: $f_z = f / z_f n$

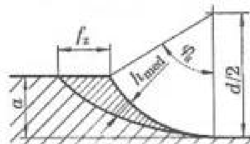
gdje znače: f brzinu posmaka, z_f broj zubaca glodala.

Srednja glavna sila pri glodanju:

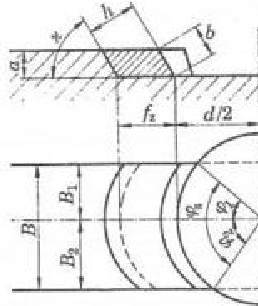
$$F_{z\,med} = b\, h_{med}\, k_{c1x1} (h_s / h_{med})^{c_c} \cdot z_i$$

gdje su: k_{c1x1} reducirana sila rezanja, b geometrijska širina strugotine, h_{med} srednja geometrijska debljina strugotine, h_s normalna debljina strugotine 1 mm, z eksponent debljine, ovisan o tvari, z_i srednji broj zubiju glodala koji režu u zoni kuta $\hat{\varphi}_s$ (rad).

$z_i = z_f \hat{\varphi}_s / 2\pi$ $\hat{\varphi}_s = \pi/180° \cdot \hat{\varphi}_s°$



Obodno glodanje



Sučeljeno glodanje

$b = B$

$h_{med} = 2\, a\, s_z / \hat{\varphi}_s\, d$

$\varphi_s = \text{arc cos}\,(1 - 2\,a/d)$

a dubina glodanja

d promjer glodala

B širina obrađivane plohe

$b = a / \sin \varkappa$

$h_{med} = s_z \sin \varkappa / d \cdot (B_1/\hat{\varphi}_1 + B_2/\hat{\varphi}_2)$

$\varphi_1 = \text{arc sin}\,(2B_1/d)$ $\varphi_2 = \text{arc sin}\,(2B_2/d)$

Obrađivana tvar	$k_c 1 \times 1$ N/mm²	c_c	Obrađivana tvar	$k_c 1 \times 1$ N/mm²	c_c
čelik Č 0545	2 050	0,26	čelik Č 4320	2 200	0,26
Č 0645	2 200	0,17	Č 5421	2 300	0,30
Č 0745	2 200	0,20	Č 4731	2 300	0,21
			Č 4732	2 600	0,26
Č 1531	2 300	0,14	sivi lijev	1 050	0,26
Č 1731	2 200	0,18	tvrdi lijev	2 100	0,19

Smjernice za broj zubaca na glodalu od brzoreznog čelika (za obradbu normalnih tvari)

Glodalo	Broj zubaca glodala za promjer glodala (mm)										
	20	30	40	50	60	75	90	110	130	150	200
za duge rupe	2	3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
vretenasto	6	6	6	–	–	–	–	–	–	–	–
valjkasto	–	–	6	6	6	6	8	8	10	10	–
valjkasto-čeono	–	–	8	8	8	10	12	12	14	16	–
kutno-čeono	–	–	10	12	14	16	18	20	22	24	–
pločasto											
– ravno ozubljeno	–	–	–	8	8	10	12	12	14	16	18
– križno ozubljeno	–	–	–	10	10	12	14	14	16	18	20
profilno, zatokareno	–	–	8	10	10	10	12	14	16	18	–
odvaljno	–	–	–	12	10	10	9	9	9	8	8
za utore T	8	10	12	12	–	–	–	–	–	–	–
za navoje											
– ravno ozubljeno	8	12	14	16	18	20	–	–	–	–	–
– vijčano ozubljeno	–	10	12	14	16	18	–	–	–	–	–
pilasto	–	–	–	–	34	40	44	50	52	56	64
glodalne glave (s noževima)	–	–	–	–	–	–	–	8	10	10	12

Općenito je za obradbu žilavih i tvrdih tvari potrebno više zubaca, a za lake kovine manje nego za normalne tvari.

Smjernice za kutove na glodalima od brzoreznog čelika i glodalnim glavama s noževima od tvrdih kovine (α stražnji kut, γ prednji kut, λ nagibni kut)

Obrađivana tvar	Glodala od brzoreznog čelika												Glodalne glave s noževima od tvrdih kovina		
	vretenasta			valjkasta			pločasta križno ozupčana			glave s noževima					
	α	γ	λ	α	γ	λ	α	γ	λ	α	γ	λ	α	γ	λ
sivi lijev	7	12	30	6	12	40	6	12	15	6	15	12	5	12	0
tvrdi lijev	4	8	15	4	8	30	3	6	10	3	5	5	3	8	–5
temperirani lijev	6	12	30	5	12	40	5	12	20	5	12	12	4	10	+5
čelični lijev	6	10	30	5	12	40	5	10	20	5	10	7	4	10	+5
čelik															
600 N/mm²	8	15	30	7	15	45	7	15	20	7	15	15	6	15	+10
900 N/mm²	7	10	20	6	12	40	6	12	15	6	10	20	4	10	+5
1 000 N/mm²	6	6	15	5	8	35	5	7	10	5	6	7	3	6	+5
bakar	6	12	45	6	20	45	6	15	20	6	25	15	6	15	+20
mjed	6	12	35	6	15	45	6	15	20	6	8	12	4	12	+12
bronca	6	10	30	5	12	40	6	12	15	6	15	12	3	10	–5
Al slitine	10	25	40	8	25	50	8	25	30	8	25	20	8	25	+30
Mg slitine	10	25	40	8	25	50	8	25	30	8	30	25	8	25	+30

Brzina rezanja v_c /(m/min) pri protusmjernom glodanju

Obrađivana tvar	Glodala od brzoreznog čelika				Glodalne glave s noževima od tvrde kovine
	vretenasta	valjkasta, pločasta	valjkasto-čeona	glave s noževima	
sivi lijev					
SL 20	16 ... 25	14 ... 20	16 ... 22	17 ... 25	60 ... 100
SL 25	10 ... 16	10 ... 16	12 ... 17	12 ... 18	30 ... 50
čelični lijev					
ČL 0500	14 ... 22	12 ... 18	14 ... 20	15 ... 22	60 ... 100
čelik					
500 N/mm²	18 ... 28	16 ... 24	18 ... 28	20 ... 30	120 ... 200
600 N/mm²	18 ... 28	16 ... 24	18 ... 28	18 ... 28	100 ... 160
700 N/mm²	17 ... 25	15 ... 20	17 ... 23	16 ... 24	80 ... 120
Č 1530	18 ... 26	16 ... 22	18 ... 25	18 ... 28	100 ... 160
Č 4730	14 ... 20	12 ... 18	14 ... 20	15 ... 22	60 ... 100
Č 4732	12 ... 20	11 ... 18	12 ... 20	14 ... 22	40 ... 70
bakar	30 ... 50	30 ... 50	40 ... 50	40 ... 60	100 ... 200
mjed	40 ... 60	30 ... 50	40 ... 60	50 .. 70	150 ... 200
bronca (Sn)	30 ... 40	25 ... 40	40 ... 50	40 ... 60	100 ... 150
aluminij	300 ... 400	250 ... 300	300 ... 400	400 ... 500	800 ... 1 000
Al slitine	200 ... 250	140 ... 180	200 ... 250	300 ... 400	600 ... 800
Mg slitine	300 ... 400	300 ... 400	400 ... 500	400 ... 500	800 ... 1 000

Posmaci za svaki zubac glodala f_z (mm/zubac) pri protusmjernom glodanju

Obrađivana tvar	Glodala od brzoreznog čelika					Glodalne glave s noževima od tvrde kovine
	vretenasta	pločasta	valjkasta	valjkasto-čeona	glave s noževima	
sivi lijev						
SL 20	0,05	0,07	0,2	0,25	0,3	0,1
SL 25	0,02	0,05	0,1	0,15	0,1	0,05
čelični lijev						
ČL. 0500	0,04	0,06	0,15	0,2	0,2	0,08
čelik						
500 N/mm²	0,05	0,07	0,2	0,25	0,3	0,1
600 N/mm²	0,05	0,06	0,15	0,2	0,3	0,1
700 N/mm²	0,03	0,06	0,1	0,15	0,2	0,08
Č 1530	0,03	0,07	0,2	0,2	0,3	0,1
Č 4730	0,03	0,06	0,1	0,15	0,2	0,08
Č 4732	0,02	0,05	0,08	0,1	0,15	0,06
bakar	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,12
mjed	0,05	0,07	0,2	0,25	0,3	0,12
bronca (Sn)	0,04	0,06	0,15	0,2	0,2	0,1
aluminij	0,05	0,07	0,15	0,2	0,2	0,1
Al slitine	0,03	0,06	0,15	0,15	0,15	0,07
Mg slitine	0,04	0,07	0,1	0,15	0,1	0,06

Brušenje

Temeljni su načini brušenja:

– po obliku izratka: vanjsko kružno brušenje, nutarnje brušenje i plosno brušenje

– po obliku brusa: profilno brušenje.

Brus je sastavljen od zrnaca brusnog sredstva različite veličine koja su međusobno spojena vezivom. Brus je određen geometrijskim oblikom i dimenzijama, brusnim sredstvom, kakvoćom zrna, vezivom, tvrdoćom i strukturom.

Brzina brušenja (rezanja) v_c je zbroj obodne brzine brusa v_b i brzine posmaka v_f (pri kružnom ili plosnom brušenju)

$$v_c = v_b + v_f$$

$$v_b = d_b \pi n_b$$

gdje su: d_b promjer brusa, n_b brzina vrtnje brusa.

Posmična brzina vrtnje izratka (pri kružnom bušenju $v_f = v_0$) iznosi

$$v_0 = d_0 \pi n_0$$

gdje su: d_0 promjer izratka, n_0 brzina vrtnje izratka.

O posmičnoj brzini vrtnje izratka uvelike ovisi kakvoća brušenja i trošenje brusa.

Najvažnija sredstva za brušenje

Tvar	Kemijski sastav	Tvrdoća (Mohs)	Uporaba
smirak	60 ... 65 % Al_2O_3	8	meki čelik, temperirani lijev
korund			
– naravni	90 ... 96 % Al_2O_3	9	žilavi čelici
– normalni	95 ... 98 % Al_2O_3	9	tvrdi čelici, čelični lijev
– plemeniti	iznad 99 % Al_2O_3	9	tvrdi čelici, brušenje alata
silicijev karbid	SiC (krist.)	> 9	sivi lijev, tvrdi lijev, tvrde kovine, meke kovine, ugljen, staklo, kamenština
borni karbid	B4C (krist.)	> 9	tvrde kovine
dijamant	C (krist.)	10	tvrde kovine, staklo, kamenština

Veličina brusnog zrna određena je brojem očica sita za zrna na duljini 25 mm, a finog zrna i praha ispiranjem i otpuhivanjem.

Kakvoća zrna	Oznaka zrna					Kakvoća zrna	Oznaka zrna				
vrlo grub	8	10	12			fin	70	80	90	100	120
grub	14	16	20	24		vrlo fin	150	180	200	220	240
osrednji	30	36	46	50	60	prah	280	320	400	500	600

Smjernice za izbor veličine zrna:

- prvo brušenje 20 ... 36
- konačno brušenje 46 ... 80
- fino brušenje 100 ... 200
- najfinije brušenje 220 ... 600

Veziva (ljepila) za brusove su:

- mineralna (magnezitna, silikatna),
- keramička – za jako pečene brusove (vrlo prikladne poroznosti),
- vegetacijska (guma, ulje, šelak), koja su osobito elastična.

Vrsta veziva	Normalna oznaka	Vrsta veziva	Normalna oznaka
keramičko	V	magnezitno	O
umjetne smole	B	silikatno	S
šelak (naravne smole)	E	guma	R

Tvrdoćom brusa označujemo otpor veziva prema ljuštenju zrna iz brusa.

Stupanj tvrdoće	Oznaka tvrdoće	Uporaba
vrlo mek	EFG	plošno brušenje čelika
mek	HIJK	kružno brušenje sivog lijeva i kaljenog čelika
polutvrd	LMNO	kružno brušenje mekog i srednjetvrdog čelika, brušenje alata
tvrd	PRS	ručno brušenje tokarskih noževa, brušenje listova pila
vrlo tvrd	TUV	brušenje većih predmeta, grubo brušenje tvrdih i oštrih rubova
osobito tvrd	XYZ	brušenje čeličnih kugli

Struktura označuje sastav brusa, tj. obujamne udjele zrna, veziva i pora u brusu

$$V_z + V_v + V_p = 100\ \%$$

gdje znače u postotcima: V_z obujamni udio zrna, V_v obujamni udio veziva, V_p obujamni udio pora.

Vrsta strukture	gusta	osrednja	rijetka
Oznaka strukture	1 2 3	4 5 6	7 8 9

Najveće brzine brušenja (obodne brzine brusova)

Vezivo	Način brušenja	Najveća obodna brzina $v_{c\,max}$/(m/s)			
		za brusne ploče $d_b \leq 150$ mm		za brusne ploče $d_b > 150$ mm	
		ravne i približno ravne	ostale	ravne i približno ravne	ostale
mineralno	ručno	15	15	15	12
	strojno	25	20	20 [1]	15
keramičko biljno umjetne smole	ručno	30	25	25	20
	strojno	35	30	30	25

Obodne brzine brusova od korunda [2], koje su najprikladnije za brušenje raznih tvari

Obrađivana tvar	Obodne brzine v_c/(m/s) [3] za brušenje					
	vanjsko	nutarnje	plošno	alata	za čišćenje	za rezanje
sivi lijev	25	25	20	–	25	45 ... 80
čelik	30	25	25	25	< 45	45 ... 80
tvrde kovine	8	8	8	12	–	45 ... 80
lake kovine	35	25	30	–	–	45 ... 80

Posmična brzina vrtnje izratka v_0 pori kružnom brušenju

Obrađivana tvar	Posmična brzina vrtnje v_c/(m/s)		Obrađivana tvar	Posmična brzina v_c/(m/s)	
	vanjsko brušenje	nutarnje brušenje		vanjsko brušenje	nutarnje brušenje
sivi lijev			crveni lijev		
grubo brušenje	0,25	0,35	grubo brušenje	0,3	0,5
fino brušenje	0,125		fino brušenje	0,25	
čelik			lake kovine		
grubo brušenje	0,25	0,3	grubo brušenje	1,0	0,6
fino brušenje	0,125		fino brušenje	0,6	

[1] Najveća obodna brzina velikih brusnih ploča ($d_b > 1\,000$ mm) smije dostići najviše 15 m/s pri ručnom i strojnom brušenju.

[2] Za brusove od silicijeva karbida prikladnije su nešto manje brzine nego za brusove od korunda.

[3] Brušenje brzinom većom od najveće dopuštene $v_{c\,max}$ (v. gornju tablicu) dopušteno je samo posebnim brusovima koji su posebno ispitani za te brzine, a i tada samo na posebnim brusilicama.
Svaki brus djeluje pri većim obodnim brzinama tvrđe, a pri manjima mekše.

Posebne obradbe

Obradba dijamantima

Dijamant je alat za finu obradbu lakih kovina, bakrenih i cinčanih slitina te sivog lijeva, a dijelom i kaljenog čelika (za obradbu mekog čelika nije prikladan). Dijamantom obrađujemo također tvrdu gumu, ljepenku i izolacijske tvari. Zbroj kutova $\alpha + \beta + \gamma$ iznosi redovito 90°. Za negativan prednji kut γ može biti $\beta \geq 90°$.

Honanje (vlačno glačanje)

Kao alat služe posebna premjestiva držala na koja su prilijepljeni brusovi (3 ... 10) finoga zrna u keramičkom vezivu ili vezivu od umjetne smole. Brzina brušenja iznosi 10 ... 20 m/s, a posmak 16 ... 20 m/min. Potrebno je intenzivno hlađenje rijetkim uljem ili petrolejem. Točnost obradbe iznosi 0,01 mm.

Lepanje (glačanje brusnim prahom)

Lepanje je konačna obradba izratka nakon odgovarajuće prethodne obradbe. Alati za lepanje su od različitih kovina (sivog lijeva, bakra, bakrenih slitina, bijele kovine, antimona, olova). Kao sredstvo za lepanje rabi se kromov oksid, prah korunda ili pak dijamanta. Ta se sredstva miješaju s uljem, petrolejem, mašću ili sl. Postiže se granična točnost u tolerancijama od ± 5 µm.

Superfinish

Alat se sastoji od više brusova, vrlo fine kvalitete zrna (100 ... 1 000) i guste strukture, koji pri relativno malom pritisku na obrađivanu površinu osciliraju (pri pomaku od 2 ... 10 mm s 200 ... 2 100 pomaka u minuti) u aksijalnom smjeru izradka (koji se okreće). Potrebno je intenzivno hlađenje (petrolej s dodatcima). Postiže se hrapavost od 0,2 ... 0,5 µm.

Ultrazvučna obradba kovina

Proces se temelji na erozivnom djelovanju što ga izazivaju mali, veoma tvrdi i oštrobridni kristali brusnog sredstva (u prostoru između alata i izratka) na koje djeluju visokofrekventni mehanički titraji alata. Alat može u izratku izdupsti oblik koji točno odgovara njegovu profilu. Obradba je uporabljiva za najtvrđe i krhke tvari.

Elektroerozivna obradba kovina

Pri toj obradbi nema djelovanja mehaničkih sila. Čestice se tvari odstranjuju djelovanjem električnog izbijanja između dviju elektroda, od kojih je jedna alat (bakar, mjed), a druga izradak. Visoka temperatura i tlak što nastaju pri električnom izbijanju u vrlo malom prostoru izazivaju raspršivanje sitnih čestica tvari, pri čemu elektrode također djelomice ispare. Erozivni učinak većih uređaja (snage do 15 kW) iznosi približno 500 ... 800 mm³/min pri obradbi čelika, a 80 ... 100 mm³/min pri obradbi tvrdih kovina.

Postojanost alata

Alat za rezanje podvrgnut je za vrijeme rada mehaničkim, toplinskim i kemijskim opterećenjima koja uzrokuju promjenu geometrijskog oblika oštrice, tj. njezinu istrošenost.

Istrošenost je najveća na onim mjestima alata koja su u izravnom dodiru s izratkom odnosno strugotinom, tj. na prednjoj i stražnjoj plohi. Glavni su uzroci trošenju alata:

- plastična deformacija alata zbog utjecaja temperature
- izlomljenost alata kao posljedica utjecaja dinamičkog opterećenja pri odvajanju strugotine koje prelazi titrajnu čvrstoću alata na savijanje
- gubitak tvari u obliku mikroskopskih čestica koje odlaze dijelom sa strugotinom, a dijelom ostaju prilijepljene uz površinu izratka.

Postojanost alata T je istrošenošću određeno trajanje oštrice između dvaju brušenja.

Postojanost T – iskustveno – ovisi ponajprije o brzini rezanja v_c

$$T = m/v_c^c$$

gdje su m i c konstante.

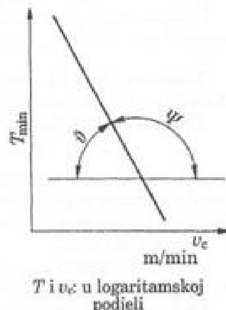
Logaritmiranjem dobivamo oblik

$$\lg T = \lg m - c \lg v_c$$

što u dijagramu s logaritamskom podjelom odgovara jednadžbi pravca.

Krivulja postojanosti (ili krivulja $T - v_c$) prikazuje ovisnost postojanosti T o brzini rezanja v_c.

Povećava li se brzina rezanja v_c postojanost alata opada.



T i v_c u logaritamskoj podjeli

Brzini rezanja v_{c1} odgovara postojanost T_1, brzini rezanja v_{c2} postojanost T_2:

$$T_1 = m/v_{c_1}^c \qquad T_2 = m/v_{c_2}^c$$

odakle proizlazi da konstanta c odgovara nagibu pravca (u dijagramu s logaritamskom podjelom), tj. kvocijentu

$$c = (\lg T_1 - \lg T_2)/(\lg v_{c2} - \lg v_{c1}) = \tan \vartheta = -\tan \psi \qquad \psi = 180° - \vartheta$$

Iz poznate brzine rezanja v_{c60} pri postojanosti T_{60} izračunavamo brzinu rezanja v_{ct} pri drukčijoj postojanosti T_t pomoću jednadžbe

$$v_{ct} = v_{c60} \sqrt[c]{T_{60}/T_t}$$

*

U tablicama na str. 716 ... 724 predočene su brzine rezanja za alat od brzoreznog čelika ili tvrde kovine. Slojem titanovog nitrida na oštrici može se pod određenim uvjetima postići višestruko povećana postojanost.

Optimalna brzina rezanja

Troškove obradbe za jedan izradak S (n.j.[1]/kom.) možemo podijeliti na pojedinačne troškove S_p, opće troškove S_s i troškove alata S_0

$$S = S_p + S_s + S_0 .$$

Pojedinačni troškovi S_p (npr. troškovi transporta i upinjanja izradka i sl.) ovise samo o izratku i ne mijenjaju se s brzinom rezanja v_c.

Opći troškovi S_s (npr. troškovi za radilicu – otpis, uzdržavanje, energija, – troškovi osobnih dohodaka, upravni troškovi i sl.) su reducirani na pojedini izradak, to manji što su podijeljeni na veći broj izradaka, dakle koliko je kraće vrijeme obradbe; stoga se s povećanjem brzine rezanja v_c znatno smanjuju.

Troškovi alata S_0 ovise o postojanosti alata T pa se zato s brzinom rezanja v_c jako povećavaju.

Troškove alata S_0 izračunavamo iz jednadžbe

$$S_0 = (V_n - V_i + i_b S_b)/n_t = (V_n - V_i + i_b S_b)/n_T (i_b + 1)$$

pri čemu su: V_n cijena novog alata, V_i cijena istrošenog alata, S_b troškovi jednokratnog brušenja, i_b broj brušenja do istrošenosti alata, n_t broj svih izradaka u vremenu t trajnosti alata, n_T broj izradaka u vremenu T postojanosti alata.

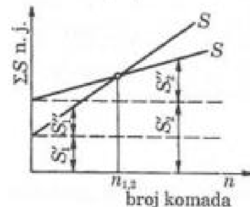
Broj svih izradaka u_t ovisan je prije svega od alatne tvari i izratka te o brzini rezanja v_c, posmaka f i dubine rezanja a.

Optimalna brzina rezanja $v_{c\,opt}$ je ona brzina rezanja, pri kojoj su troškovi izradbe S za jedan izradak najniži.

Izbor optimalnog tehnološkog postupka

Izradak možemo obraditi različitim tehnološkim radnjama (npr. tokarenjem ili glodanjem; na univerzalnom ili serijskom stroju itd.).

Za obavljanje svake tehnološke radnje potrebni su neki stalni troškovi S', neovisni o broju komada, te posebni troškovi S'', ovisni o pojedinom komadu te stoga rastu s njihovim brojem.



Ukupni su troškovi

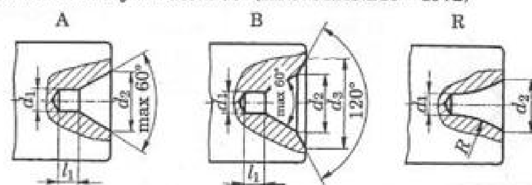
$$\Sigma S = S' + S''.$$

Lijeva slika prikazuje troškove S_1 i S_2 za 2 različita tehnološka postupka (1 i 2). Do broja komada $n_{1,2}$ jeftiniji je postupak 1, a dalje postupak 2.

[1] n.j. = novčana jedinica

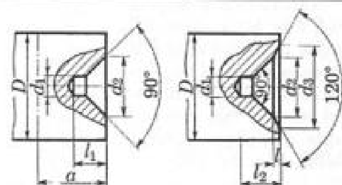
Središnja gnijezda

Gnijezda sa središnjim kutom 60° (HRN M.A5.210 – 1972)



Nazivni promjer [1] d_1 mm	min l_1 mm	d_2 mm	d_3 mm	min R mm	max R mm
(0,5)	0,8	1,06	–	–	–
(0,63)	0,9	1,32	–	–	–
(0,8)	1,1	1,70	–	–	–
1,0	1,3	2,12	3,15	2,5	3,15
(1,25)	1,6	2,65	4	3,15	4,0
1,6	2,0	3,35	5	4,0	5,0
2,0	2,5	4,25	6,3	5,0	6,3
2,5	3,1	5,30	8	6,3	8,0
3,15	3,9	6,70	10	8,0	10,0
4,0	5,0	8,50	12,5	10,0	12,5
(5,0)	6,3	10,60	16	12,5	16,0
6,3	8,0	13,20	18	16,0	20,0
(8,0)	10,1	17,0	22,4	20,0	25,0
10,0	12,8	21,2	28	25,0	31,5

Gnijezda sa središnjim kutom 90° (HRN M.A5.211 – 1953) rabe za dijelove s masom većom od 100 kg i pri obradbi velikim silama.

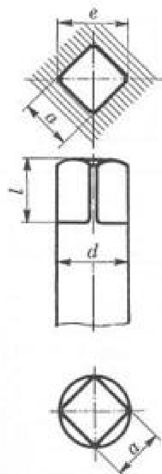


Promjer D mm	d_1 mm	d_2 mm	d_3 mm	l_1 mm	l_2 mm	≈ l mm	a [2] mm
25) ... 63	3	9	12,5	4,5	5,5	1	8
63) ... 100	5	13	18	6,5	8	1,5	11
100) ... 160	8	22	29	11	13	2	18

[1] Treba se kloniti vrijednosti u zagradama.

[2] Izmjere za mjesto reza na predmetu na kojem ne smije ostati gnijezdo.

Četverobridi za alat (HRN K.A2.001 – 1969)



Na dršcima promjera do 3 mm četverobrid redovito prelazi u središnji vršak, a na dršcima promjera većeg od 3 mm nalazi se na kraju četverobrida središnje gnijezdo oblika A (v. str. 731)

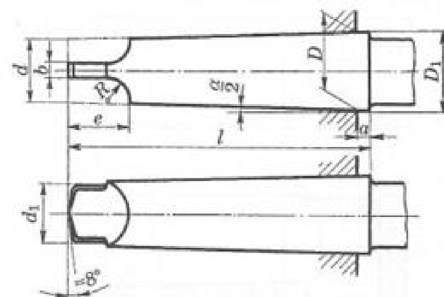
Promjeri drška [1] preporučeni d mm	Promjeri drška [1] mogući d mm	Četverobrid a mm	Četverobrid l mm
(1,12)	1,06) ... 1,18	0,9	4
1,25	1,18) ... 1,32	1	4
(1,4)	1,32) ... 1,5	1,12	4
1,6	1,5) ... 1,7	1,25	4
(1,8)	1,7) ... 1,9	1,4	4
2	1,9) ... 1,12	1,5	4
(2,24)	2,12) ... 2,36	1,8	4
2,5	2,36) ... 2,65	2	4
(2,8)	2,65) ... 3	12,4	5
3,15	3) ... 3,35	2,5	5
(3,55)	3,35) ... 3,75	2,8	5
4	3,75) ... 4,25	3,15	6
(4,5)	4,25) ... 4,75	3,55	6
5	4,75) ... 5,3	4	7
(5,6)	5,3) ... 6	4,5	7
6,3	6) ... 6,7	5	8
(7,1)	6,7) ... 7,5	5,6	8
8	7,5) ... 8,5	6,3	9
(9)	8,5) ... 9,5	7,1	10
10	9,5) ... 10,6	8	10
(11,2)	10,6) ... 11,8	9	12
12,5	11,8) ... 13,2	10	13
(14)	13,2) ... 15	11,2	14
16	15) ... 17	12,5	16
(18)	17) ... 19	14	18
20	19) ... 21,2	16	20
(22,4)	21,2) ... 23,6	18	22
25	23,6) ... 26,5	20	24
(28)	26,5) ... 30	22,4	26
31,5	30) ... 33,5	25	28
(35,5)	33,5) ... 37,5	28	31
40	37,5) ... 42,5	31,5	34
(45)	42,5) ... 47,5	35,5	38
50	47,5) ... 53	40	42
(56)	53) ... 60	45	46
63	60) ... 67	50	51
(71)	67) ... 75	56	56
80	75) ... 85	63	62
(90)	85) ... 95	71	68
100	95) ... 106	80	75

[1] Preporučeni promjeri bez zagrada smatraju se temeljnima (u nizu normiranih brojeva R 10), a preporučeni promjeri u zagradama su pomoćni (u nizu normiranih brojeva R 20).

Stožasti dršci za alat

Morseov stožac	0	1 : 19,212	= 0,052 05
	1	1 : 20,047	= 0,049 88
	2	1 : 20,020	= 0,049 95
	3	1 : 19,922	= 0,050 20
	4	1 : 19,254	= 0,051 94
	5	1 : 19,002	= 0,052 63
	6	1 : 19,180	= 0,052 14
Metrički stožac		1 : 20	= 0,05

Vanjski stošci (HRN K. D0.01 - 1982)

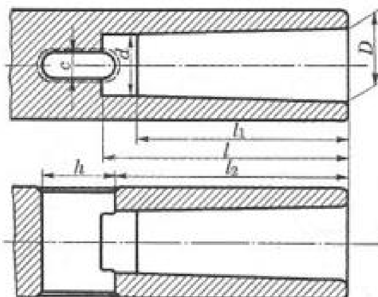


Stožac		$\frac{\alpha}{2}$	$\frac{D}{\text{mm}}$	≈ $\frac{D_1}{\text{mm}}$	≈ $\frac{d}{\text{mm}}$	max $\frac{d_1}{\text{mm}}$	max $\frac{l}{\text{mm}}$	max $\frac{e}{\text{mm}}$	$\frac{R}{\text{mm}}$	$\frac{a}{\text{mm}}$
Morseov	0	1° 29′ 27″	9,045	9,2	6,1	6	59,5	10,5	4	3
	1	1° 25′ 43″	12,065	12,2	9	8,7	65,5	13,5	5	3,5
	2	1° 25′ 50″	17,780	18	14	13,5	80	16	6	5
	3	1° 26′ 16″	23,825	24,1	19,1	18,5	99	20	7	5
	4	1° 29′ 15″	31,267	31,6	25,2	24,5	124	24	8	6,5
	5	1° 30′ 26″	44,399	44,7	36,5	36	156	30	11	6,5
	6	1° 29′ 36″	63,348	63,8	52,4	51	218	44	17	8
metrički	80	1:20 = 0,05 1° 25′ 56″	80	80,4	69	67	228	48	24	8
	100		100	100,5	87	85	270	58	30	10
	120		120	120,6	105	102	312	68	36	12
	(140)		140	140,7	123	120	354	78	42	14
	160		150	160,8	141	138	396	88	48	16
	(180)		180	180,9	159	156	438	98	54	18
	210		200	201	177	174	480	108	60	20

Osim takvih koničnih držaka rabe se i dršci koji na čelu imaju navoj za vijak:

stožac	navoj	stožac	navoj
Morseov 1	M 6	metrički:	
2	M 10	80	M 30
3	M 12	100, 120, 140	M 36
4	M 16	160, 180, 200	M 48
5	M 20		
6	M 24		

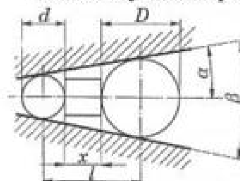
Unutarnji stošci (HRN M.G0.051 - 1968)



Stožac		D mm	d mm	l_1 mm	l_{min} mm	l_2 mm	c mm	h mm
metrički	4	4	3	20	25	21	2,2	8
	6	6	4,6	28	34	29	3,2	12
Morseov	0	9,045	6,7	45	52	49	3,9	15
	1	12,065	9,7	47	56	52	5,2	19
	2	17,780	14,9	58	67	62	6,3	22
	3	23,825	20,2	72	84	78	7,9	27
	4	31,267	26,5	92	107	98	11,9	32
	5	44,399	38,2	118	135	125	15,9	38
	6	63,348	54,8	164	188	177	19	47
metrički	80	80	71,5	170	202	186	26	52
	100	100	90	200	240	220	32	60
	120	120	108,5	230	276	254	38	70
	(140)	140	127	260	312	286	44	80
	160	160	145,5	290	350	321	50	90
	(180)	180	164	330	388	355	56	100
	200	200	182,5	350	424	388	62	110

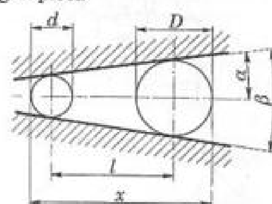
Mjerenje kutova

Određivanje kutova pomoću dviju okruglih ploča



$$\sin\alpha = \frac{D-d}{2x+(D+d)}$$

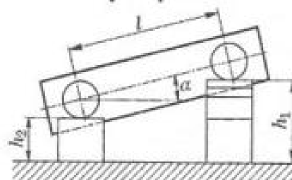
$$x = \frac{D(1-\sin\alpha) - d(1+\sin\alpha)}{2\sin\alpha}$$



$$\sin\alpha = \frac{D-d}{2x-(D+d)}$$

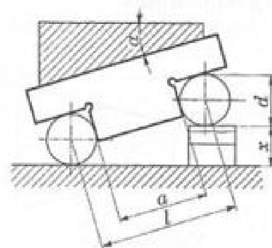
$$x = \frac{D(1+\sin\alpha) - d(1-\sin\alpha)}{2\sin\alpha}$$

Sinusov postupak



$$\sin\alpha = \frac{h_1-h_2}{l}$$

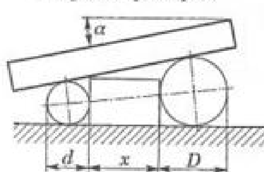
$$h_1 - h_2 = l\sin\alpha$$



$$\sin\alpha = \frac{x}{l} = \frac{x}{a+d}$$

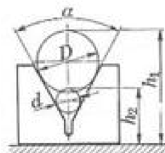
$$x = l\sin\alpha = (a+d)\sin\alpha$$

Tangensov postupak

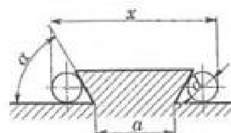


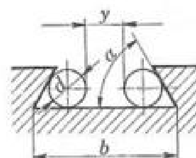
$$\tan\frac{\alpha}{2} = \frac{D-d}{D+d+2x}$$

$$x = \frac{D-d}{2}\cot\frac{\alpha}{2} - \frac{D+d}{2}$$



$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{D - d}{2\,(h_1 - h_2) - (D - d)}$$

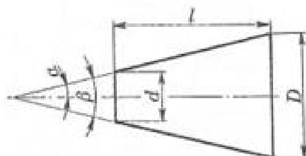




$$x = a + d\left(1 + \cot\frac{\alpha}{2}\right) \qquad y = b + d\left(1 + \cot\frac{\alpha}{2}\right)$$

Mjerenje stošca

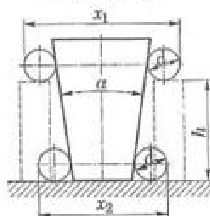
Stožnost obično izražavamo omjerom



$$\frac{(D - d)}{l} = 1 : k$$

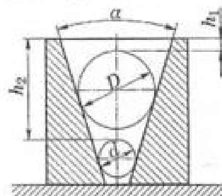
$$\tan\alpha = \frac{D - d}{2\,l} = \frac{1}{2\,k}$$

Vanjski stožac



$$\tan\frac{\alpha}{2} = \frac{x_1 - x_2}{2\,h}$$

Unutarnji stožac



$$\tan\frac{\alpha}{2} = \frac{D - d}{2\,(h_2 - h_1) - (D - d)}$$

KOROZIJA I POVRŠINSKA ZAŠTITA

Korozija

Korozija je nenamjerni kemijski ili elektrokemijski utjecaj na tvar pri čemu se mijenja njezina struktura od površine prema unutrašnjosti.

Kemijske reakcije javljaju se ponajprije pri djelovanju električki nevodljivim tvarima (npr. pri suhim plinovima) na tvar; *elektrokemijske reakcije* izazivaju električki vodljive tvari (npr. vodljive tekućine – elektroliti).

Prema nastajanju korozije razlikujemo:

– jednoličnu koroziju koju ponajprije izazivaju kemijske reakcije, a pojavljuje se na cjelokupnoj površini predmeta

– lokalnu koroziju koju većinom izazivaju elektrokemijske reakcije, a ograničena je na određena manja mjesta na predmetu.

Jednolična korozija može neograničeno napredovati ako proizvodi korozije po nastajanju odmah odlaze s tvari (ako se ljušte, tope, otpadaju) čime omogućuju daljnje korozijsko djelovanje (npr. oksidacija željeza pri visokim temperaturama ili razjedanje Cu s talinom Sn). Jednolična korozija se zaustavlja, ako se proizvodi korozije tijesno i čvrsto priljube uz temeljnu tvar te je zaštićuju pred daljnjom korozijom (npr. zaštitni sloj na površini pri Pb, Al, Cu ili – nevidljivo tanak – i pri Ni, Cr itd.).

Primjeri otpornosti nekih kovinskih tvari prema jednoličnoj koroziji

Utjecaj korozije	Kovinska tvar (sastav u %)								
	Fe	Cr	Ni	Fe + 18 Cr 8 Ni	Al	Al + 10 Si	Cu	Cu + 8 Sn	Ni + 30 Cu
Voda									
destilirana	–	++	++	++	+–	++	+	+	++
meka	+–	++	++	++	+–	++	+	+	++
tvrda	+	++	++	++	++	++	+	+	++
morska	–	+	++	+	–	++	–	+	++
Plinovi									
norm. atmosfera	+	++	++	++	++	++	+	++	++
morski zrak	+–	+	+	+	–	++	–	+–	+
dimni plinovi	+–	++	–	++	++	++	–	+–	++
pregr. para	+–	++	++	++	–	++	–	+	++
Kiseline									
HNO_3 – 10%	––	+	––	++	+	++	–	–	+
– konc.	++	++	––	++	++	++	––	––	+
HCI – 0,5%	––	+–	++	+	––	++	–	+–	+
– konc.	––	–	––	—	––	+	––	–	+
H_2SO_4 – 10%	––	+	+–	++	–	+	+	+	++
– konc.	+–	+	+–	++	––	++	–		
Lužine									
KOH – 20%	++	+	++	++	––	++	+	+	++
NaOh – 20%	++	+	++	++	––	++	+–	+	++

Ocjene korozijske otpornosti ++ vrlo dobra, + dobra, +– osrednja, –loša, –– vrlo loša.

Lokalna korozija je većinom elektrokemijska pojava pri kojoj dvije kovine, različitih elektrokemijskih potencijala, u dodiru s vodljivom tekućinom (elektrolitom) tvore galvanski članak.

Elektrokemijski naponski niz kovina sastavljen je po njihovim normalnim potencijalima s obzirom na normalnu vodikovu elektrodu.

Kovine manjeg potencijala nazivamo »manje plemenitim«, a one većeg potencijala »plemenitijima«.

Zbog elektrokemijskog potencijala poteče u galvanskom članku tok elektrona od anode prema katodi. Anoda (manje plemenita kovina) se pritom rastvara (korozija!), a katoda (plemenitija kovina) se prekriva (zaštita).

Raznolični elektrokemijski potencijal može proizaći iz dviju kovina, dviju faza iste kovine, razlici u strukturi, razlici napetosnog stanja itd. Što veća je potencijalna razlika, to veća će biti lokalna korozija.

Velika otpornost kovina ili njihovih slitina prema jednoličnoj (kemijskoj) koroziji ne štiti ih pred lokalnim (elektrokemijskom) korozijom.

Elektrokemijski naponski niz kovina

Kovina	Normalni potencijal V
Ka	-2,92
Na	-2,71
Mg	-2,35
Al	-1,28
Mn	-1,08
Zn	-0,76
Cr	-0,56
Fe II	-0,44
Cd	-0,40
Co	-0,27
Ni	-0,25
Sn	-0,14
Pb	-0,13
Fe III	-0,04
H	± 0,00
Cu II	+0,34
Cu III	+0,52
Ag	+0,81
Hg	+0,85
Pt	+0,87
Au	+1,50

Površinska zaštita

Pred jednoličnom (kemijskom) korozijom štitimo kovinske dijelove prikladnim otpornim tvarima.

Ako uporaba neke tvari, otporne prema koroziji, nije prikladna (zaradi čvrstoće, temperaturne otpornosti – ili cijene) dolaze u obzir postupci prevlačenja površinskim slojem: platiranje (npr. Ni na temelju Fe), potapljanje (u cink, kositar, olovo) galvaniziranje, niklanje, kromiranje), navarivanje, sinteriranje, prevlačenje kovinom (Zn, Al, Pb, Cu, Cr, Ni), prskanje plazmom i sl.

Zaštita kemijskim postupcima su: bruniranje, fosfatiranje, bondiranje, itd.

Prekrivna zaštita su: ulja, masti, premazi, ocakline i plasteni lakovi.

Pred lokalnom (elektrokemijskom) korozijom najlakše je štititi kovinske predmete u suhom prostoru, gdje ne postoji mogućnost stvaranja elektrolita. Ako to nije moguće (na slobodnom prostoru, u vlažnim prostorijama i sl.), treba posebno zaštititi spojeve kovinskih dijelova od vlage. Jednostavno je sredstvo debeo sloj masti. Značajan je i razuman izbor dvaju dijelova u dodiru (kako bi se smanjila elektrokemijska potencijalna razlika). Velikom otpornošću prema koroziji odlikuju se polimerne tvari. Stoga pri potrebi naročite otpornosti prema koroziji rješenje treba tražiti u potpuno polimernoj konstrukciji (ili njenim dijelovima).

RAZNO

TEHNIČKO PISMO

Zbog preglednosti tehničkog tiska i razlikovanja znakova za veličine i drugih znakova pišu se:
- koso znakovi veličina
- uspravno ostali znakovi.

*

U njemačkim normama (DIN 1338) je određeno što valja pisati (tiskati) uspravno, a što koso, i to:

a) Uspravno se pišu:
- brojevi napisani brojkama, npr.
  $1{,}32 \cdot 10^{-6}$, 3/4, 625-puta, $6\ r^2$, a_6
- posebni brojevi, označeni brojkama:
  Ludolfov broj π, osnova prirodnih logaritama e, imaginarna jedinica i ($\mathrm{i}^2 = -1$)
- matematički znakovi odredenog značenja, npr.:
  d, ∂, Δ, ∫, Σ, lim, sin, cos, tan, cot, log, ln, lg
- znakovi mjernih jedinica i njihovi višekratnici:
  m (metar), C (kulon, coulomb), F (farad), μ (mikro = 10^{-6}), μF (mikrofarad), mol
- znakovi kemijskih elemenata:
  Fe, H_2O, NaCl

b) Koso (*kurzivno*) se pišu:
- brojevi napisani slovima:

  $$a, b, x, y, n\text{-puta}, \sqrt[n]{3}, \ \sum_{i=1}^{n} k_i, i = 1 \dots n$$

- svi znakovi fizikalnih veličina:
  m (masa), C (kapacitet), F (sila), μ (faktor trenja)
- matematičke oznake funkcija:
  $f(x), g(x), \varphi(x), \mu(x), L(y) = y'' + f_1 y' + f_{0y}$

Indeksi veličina pišu se uspravno ako su to samo dodatne oznake veličina, npr.:

α_1 određeni kut, p_k kritični tlak, v_max najveća brzina, σ_dop dopušteno naprezanje;

koso (*kurzivno*) se pišu kada znače slovima napisane brojčane vrijednosti ili veličine:

k_n za $n = 1, 2, 3, \dots$, $w_x = \partial w / \partial x$ komponenta brzine u smjeru osi x; σ_z naprezanje u smjeru osi z, V_{p_1, T_1} obujam pri tlaku p_1, i temperaturi T_1.

Formati papira

Oznaka	Ploština m²	Izmjere mm
A0	1	841 × 1189
A1	1/2	594 × 841
A2	1/4	420 × 594
A3	1/8	297 × 420
A4	1/16	210 × 297
A5	1/32	148 × 210
A6	1/64	105 × 148

Formati papira se rabe za sve tehničke crteže, za službene dopise i različite tiskanice. Formati se mogu rabiti uzdužno ili poprečno. Za crtanje uskih i dugačkih predmeta, objekata i sličnog dopušta se produženi format, sastavljen od jednakih ili susjednih formata. Okvir crteža odmaknut je od ruba papira 5 mm.

Izmjere formata redova B i C:

Red B:	oznaka	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
	izmjere (mm)	125 × 176 ×	250 ×	353 ×	500 ×	707 ×	1000 ×	1414
Red C:	oznaka	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C0
	izmjere (mm)	114 × 162 ×	229 ×	324 ×	458 ×	648 ×	917 ×	1297

Mjerila

Crteže treba raditi samo u normiranim mjerilima:

za naravnu veličinu	1 : 1		
za smanjenja	1 : 2,5 (1 : 2)	1 : 5	1 : 10
	1 : 20	1 : 50	1 : 100
	1 : 200	1 : 500	1 : 1000
za povećanja	2 : 1	5 : 1	10 : 1

Treba se kloniti vrijednosti u zagradama.

Grčka slova

α	A	alfa	η	H	eta	ν	N	ni	τ	T	tau
β	B	beta	ϑ	Θ	t(h)eta	ξ	Ξ	ksi	υ	Υ	ipsilon
γ	Γ	gama	ι	I	jota	ο	O	omikron	φ	Φ	fi
δ	Δ, Δ	delta	κ	K	kapa	π, π	Π	pi	χ	X	hi
ε	E	epsilon	λ	Λ	lambda	ϱ	P	ro	ψ	Ψ	psi
ζ	Z	(d)zeta	μ, µ	M	mi	σ	Σ, Σ	sigma	ω	Ω, Ω	omega

Rimske brojke

I = 1	VIII = 8	LX = 60	CD = 400
II = 2	IX = 9	LXX = 70	D = 500
III = 3	X = 10	LXXX = 80	DC = 600
IV = 4	XX = 20	XC = 90	DCC = 700
V = 5	XXX = 30	C = 100	DCCC = 800
VI = 6	XL = 40	CC = 200	CM = 900
VII = 7	L = 50	CCC = 300	M = 1000

IZGOVARANJE STRANIH IMENA

Stranim imenima dodan je približan izgovor, transkribiran samo našim slovima.

Bach	bah
Bain	béin
Baumé	bomé
Beaufort	bofór
Becquerel	békerel
Bernoulli	bernúli
Bessemer	bésemer
Böhler	béler
Bohr	bor
Boltzmann	bólcman
Boyle	bojl
Briggs	brigs
Brinell	brinél
Carnot	karnó
Charpy	čárpi
Clapeyron	klápejron
Clausius	kláuzius
Colebrooke	kóulbruk
Coulomb	kulón
Cremona	kremóna
Culmann	kúlman
Curie	kirí
Curtis	kértis
D'Alembert	dalambèr
Dalton	dolton
Darcy	darsí
Descartes	dekárt
Diesel	dízl
Einstein	ájnštajn
Euler	ójlef
Fahrenheit	fárnhajt
Faraday	féredi
Fehling	féling
Francis	frénsis
Gauss	gáus
Gay-Lussac	gejlisák
Giorgi	džórdži
Grasshof	gráshof
Gray	grej
Guldin	guldín
Henry	hénri
Hertz	herc
Hooke	huk
Joule	džul
Kirchhoff	kírhhof
Laplace	laplás
Mariotte	mariót
Martin	martèn
Mayer	májer
Maxwell	méksvel
Mishima	mišíma
Mohr	mor
Mollier	móljer
Moody	múdi
Newton	njutn
Oersted	érsted
Ohm	om
Otto	óto
Pascal	paskál
Péclet	peklé
Pelton	peltn
Poiseuille	poazèj
Poisson	poasón
Prandtl	prantl
Redwood	redvúd
Renard	renár
Reynolds	rénelds
Richter	ríhter
Rockwell	rókvel
Rose	róze
Rosin	rózin
Röntgen	réntgen
Sankey	sénki
Saybolt	séjbolt
Schmidt	šmit
Seale	síl
Shore	šor
Siemens	simens
Sievert	sívert
Smith	smit
Stauffer	štáufer
Stefan	štéfan
Steiner	štájner
Student	stjúdent
Taylor	téilr
Thomas	tómas
Thomson	tómsn
Torricelli	toričéli
Vickers	víkers
Warrington	uóringtn
Watt	uót
Wheatstone	vítstoun
Wöhler	véler
Wood	vud

IZVORI BROJČANIH PODATAKA

Brojčani podatci predočeni su iz sljedećih djela:

Techniques de l'Ingénieur

Généralités, tomes I, II et III
Mécanique et Chaleur, tomes I et II
Métallurgie, tomes I, II et III
Naklada: Techniques de l'Ingénieur, Paris.

Hütte, Des Ingenieurs Taschenbuch

Herausgegeben vom Akademischen Verein Hütte, E. V. in Berlin,
Band I: Theoretische Grundlagen HÜTTE I).
Band II A: Maschinenbau, Teil A (HÜTTE II A).
Band II B: Maschinenbau, Teil B (HÜTTE II B).
Band V: Verkehrstechnik-Vermessungstechnik (HÜTTE V).
Naklada: Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin.

Hütte, Taschenbuch für Betriebsingenieure (Betriebshütte)

Herausgegeben vom Akademischen Verein Hütte, E. V. in Berlin,
Band I: Fertigung. Band II: Betrieb.
Naklada: Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin.

Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau

Band I und II.
Naklada: Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.

Машиностроение: Энциклопедический справочник

Том 1 и 2: Инженерные расчёты в машиностроении.
Том 3 и 4: Материалы машиностроения.
Naklada: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, Москва.

Ražnjević, K.: Termodinamičke tablice

Naklada: Školska knjiga, Zagreb, 1975.

Ražnjević, K.: Jedinice Međunarodnog sustava (SI) i mjerne jedinice u Hrvatskoj

Naklada: Axiom, Zagreb, 1997.

Schmidt, E.: Properties of Water and Steams in SI-Units

Naklada: Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.

Norme

HRN – Hrvatske norme.
ISO – International Standardizing Organization.
DIN – Deutches Institut für Normung.

*

U ovom, potpuno prerađenom izdanju priručnika – osim prijašnjih – uzeti su u obzir najnoviji podatci iz zakona o mjernim jedinicama i mjerilima te iz (dostupne) suvremene znanstvene i stručne literature – iz knjiga i revija.

KAZALO

D

DŽ

E

K

L

LJ

M

N

NJ

O

P

R

S

Š

T

U

V



METALSKA INDUSTRIJA VARAŽDIN

Fabijanska 33, P.P. 93
Varaždin - Hrvatska
Telefon: (042) 240-211
Telefax: (042) 242-004



PROIZVODNI PROGRAM:

- proizvodnja armature i fazonskih komada za vodu, paru, plin i naftu namijenjenu za snabdijevanje pitkom vodom, energetiku, procesnu industriju, brodogradnju i navodnjavanje
- proizvodnja armatura nazivnih veličina od DN 25÷2400 i fazonskih komada od DN 40÷700; veći promjeri zavarene izvedbe iz čelika
- nazivni pritisci PN 2,5; 4; 6; 10; 16 i 25 bara iz nodularnog lijeva GGG 40÷60, iz sivog lijeva GG 25÷30, obojenih metala i zavarene izvedbe iz čelika
- priključni spojevi: prirubnica, kolčak, KS spoj, spojevi za AC, tyton spoj
- sistemi brtvljenja: mesing/mesing, guma/mesing, sivi lijev/sivi lijev, niro/niro, guma/sivi lijev, guma/niro, guma/guma
- sistemi upravljanja armaturom: ručno, pneumatski, elektromotorni prigon, hidraulika
- zaštita izvedena: bojom, plastificiranjem, gumiranjem, cementnim malterom, teflonom
- standardi: HRN, DIN, ISO, EN, BS, UNI, ASTM
- atestirano i ispitano prema važećim propisima. Posjedujemo ateste HRVATSKOG REGISTRA, LLOYD'S REGISTER-a, DET NORSKE VERITAS-a, BUREAU VERITAS-a





Kuzman Ražnjević

Jedinice Međunarodnog sustava (SI) i mjerne jedinice u Hrvatskoj

AXIOM

Ova knjiga pokriva gotovo sva područja prirodoslovnih i tehničkih znanosti, odnosno sve gospodarske i znanstvene djelatnosti. Namijenjena je sveučilišnim i srednjoškolskim profesorima, studentima i đacima, inženjerima i tehničarima, redakcijskim i novinarskim djelatnicima, ali i drugim znanstvenicima i istraživačima koji rade u državnim uredima i institutima, te svima koji se na bilo koji način bave proizvodnjom i razmjenom dobara, bez obzira na razinu njihova znanja i izobrazbe.

U knjizi se sažeto tumače pojmovi i značenja fizikalnih veličina i mjernih jedinica, te njihov način pisanja i označavanja. Osim jedinica SI knjiga sadrži i mnoštvo starijih mjernih jedinica različitih sustava uključujući i anglo-američke jedinice, koje su izvan našeg zakona i ne pripadaju sustavu SI, te njihove odnose prema jedinicama SI, što omogućuje uporabu i starije literature.

Nazivi i znakovi fizikalnih veličina i mjernih jedinica usklađeni su s nazivima i znakovima najnovijih svjetskih normi, a u duhu hrvatskog nazivlja. Cjelovit »Zakon o mjernim jedinicama« u Republici Hrvatskoj, objavljen na koncu knjige, daje čitateljima potpunu informaciju iz ovoga područja znanosti, što je i dodatna vrijednost ovoga djela. Knjiga je napisana pregledno i lako razumljivo, a gradivo je sustavno raspoređeno, tako da svaki čitatelj može lako i brzo naći ono što ga zanima.

180 kn

Knjiga se može naručiti kod izdavača:

AXIOM d.o.o., Zagreb
Dobri dol 50
10000 Zagreb

Tel./faks: 210-464

Žiro račun: 30105-603-23425 ZAP Zagreb









Boje užarenog čelika

°C
1300
1200
1100
1000
950
900
850
800
750
700
650
600

Boje napuštanja čelika

°C
330
315
295
285
275
265
255
240
220